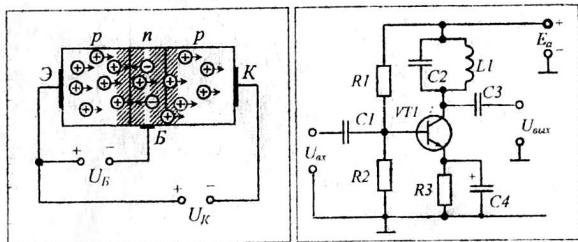


32.84

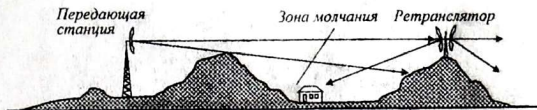
X 17

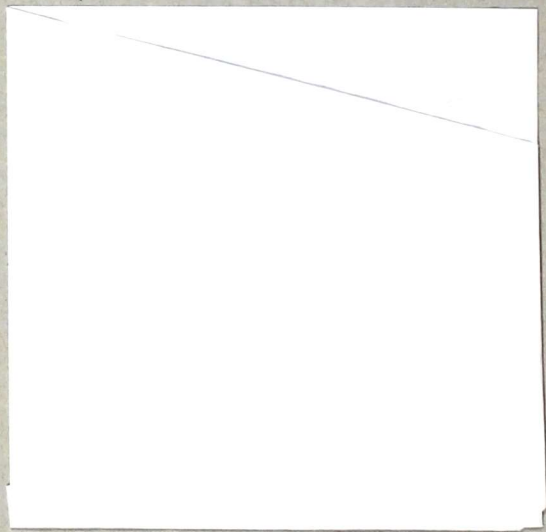
Р. Н. Халиуллин



РАДИОТЕХНИКА

Учебное пособие для студентов физических
и технических специальностей
высших учебных заведений





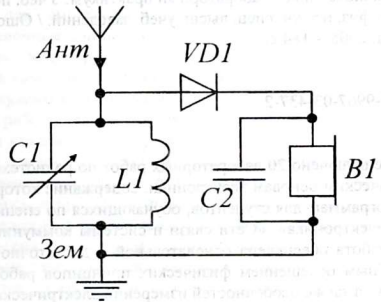
32.84

X 17

Р. Н. Халиуллин

РАДИОТЕХНИКА

Лабораторный практикум по радиотехнике и радиоэлектронике



Учебное пособие для студентов физических
и технических специальностей
высших учебных заведений

4619

БИБЛИОТЕКА 08

Омского государственного

университета

ИНВ № 934 176

Ош 2008

УДК 621.37
ББК 32.84
Х 17

Рекомендовано к печати решением Ученого Совета ОшГУ от 28.11.2007 г.

Рецензенты: Сопуев А.С. – д-р физ.-мат. наук, проф.,
проректор Ошского технолог. университета.
Усаров А.С. – канд. физ.-мат. наук, доц. каф. эксперимен-
тальной и теоретической физики ОшГУ.

Халиуллин Р.Н.

X 17 Радиотехника: Лабораторный практикум: Учеб. пособие для
студ. физ. и техн. спец. высш. учеб. заведений. / Ошск. гос. ун-т.
- Ош: 2008. - 184 с.

ISBN 978-9967-03-437-2

В пособие включено 20 лабораторных работ по радиотехнике, радиоэлектронике и физическим основам электроники, содержание которых соответствует учебным программам для студентов, обучающихся по специальностям «Физика», «Микроэлектроника», «Сети связи и системы коммуникаций». Каждая лабораторная работа обеспечена основательной и достаточной теоретической базой с подробным освещением физических принципов работы электронных приборов и схем, а также особенностей измерений электрических величин.

Содержание каждой лабораторной работы охватывает основные этапы работы студента по её выполнению: постановка цели и содержания работы, краткие теоретические сведения, схема исследования, необходимое оборудование и приборы, сборка и опробование установок, эксперименты и измерения, обработка результатов исследования, методические указания к отчету, вопросы для подготовки, список литературы.

Пособие может использоваться для самостоятельного изучения стержневых вопросов курса радиотехники и электроники.

X 2302020000-08

УДК 621.37
ББК 32.84

ISBN 978-9967-03-437-2

© Ошский государственный университет, 2008.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение курса радиотехники и радиоэлектроники в настоящее время стало одним из престижных направлений в профессиональной подготовке специалистов в области электроники, связи, вычислительной техники и автоматики. Кроме того, оно выполняет важную роль в формировании профессиональных умений будущего учителя физики, труда и общетехнических дисциплин.

Лекционные и лабораторные занятия по радиоэлектронике способствуют систематизации физико-технических знаний, полученных в школе и за годы учебы в вузе, придают этим знаниям практическую направленность, развивают измерительные, монтажные и конструкторские умения, а также навыки чтения и понимания радиоэлектронных схем.

Лабораторный практикум охватывает основные разделы электроники: электро-радиоизмерения, электронные приборы и усилители, электронные генераторы, принципы радиосвязи и преобразования электрических сигналов. В описание каждой лабораторной работы включены краткие теоретические сведения и вопросы для самопроверки. В приложении приведены необходимые для расчетов справочные данные по вакуумным и полупроводниковым электронным приборам. Такая структура содержания лабораторных работ позволяет использовать их в качестве источника новых знаний и основы для самостоятельной работы студентов над курсом, причем, контрольные вопросы по каждой лабораторной работе, безусловно, входят в содержание экзамена.

Выполнение каждой лабораторной работы требует обязательного соблюдения правила: не знаешь – не включай! Поэтому, прежде чем приступить к измерениям и экспериментам, студент должен сдать допуск, то есть, ответить на контрольные вопросы и продемонстрировать знание теории и сущности физических явлений, лежащих в основе каждой лабораторной работы.

При выполнении лабораторных работ используются различные электро- и радиоизмерительные приборы. Если какой-либо прибор студенту встречается впервые, проводится инструктаж и пробное включение под руководством преподавателя или лаборанта. От студентов требуется строгое соблюдение правил техники безопасности и бережное отношение к оборудованию лаборатории.

Данные лабораторные работы разработаны в лаборатории радиоэлектроники и физических основ электронно-вычислительной техники Ошского Государственного университета и прошли апробацию в течение более 30 лет, причем год от года в них вносились изменения, связанные со сменой электронной базы электроники и поколений радиоизмерительных приборов.

Автор будет благодарен читателям, приславшим свои замечания, которые будут учтены при издании книги на кыргызском языке.

Лабораторная работа 1

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Цель работы:

1. Познакомиться с принципами работы универсальных, многопредельных электроизмерительных приборов.
2. Научиться пользоваться ампервольтметром при измерениях в электрических цепях.

Содержание работы:

Измерение электрических параметров дискретных радиодеталей и электрических величин в цепях постоянного и переменного тока.

1. Краткие теоретические сведения

Уметь работать с электроизмерительными приборами должны представители многих технических профессий, таких, как инженеры, электромонтажники и другие, но школьному учителю физики электроизмерительные навыки просто обязательны. Ему приходится работать с вольтметрами, амперметрами и другими приборами. Они нужны не только для демонстраций, но и при ремонте и налаживании различных электрических цепей. При этом часто используется универсальный электроизмерительный прибор – *ампервольтметр*.

Перед тем как приступить к рассмотрению универсального измерительного прибора, ознакомимся с электроизмерительными приборами, служащими для измерения основных параметров электрической цепи: силы тока, напряжения, сопротивления, мощности, работы, частоты и др.

1. *Силу тока* в цепи *измеряют амперметром*. Амперметр включают в цепь последовательно с нагрузкой, ток через которую предстоит определить. В качестве нагрузки цепи может быть резистор, электрическая лампа, звонок, электродвигатель и различные электроприборы.

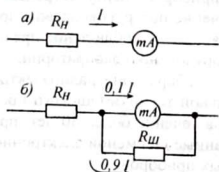


Рис. 1

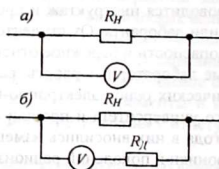


Рис. 2

При этом через амперметр, который имеет определенное сопротивление, проходит тот же ток, что и через нагрузку (рис. 1, а). Сопротивление амперметра должно быть как можно меньше, чтобы уменьшить погрешность при измерении. Дело в том, что работа амперметра основана на механическом действии тока, то есть, часть энергии измеряемого тока тратится на отклонение стрелки прибора. Для измерения малых токов служат миллиамперметры и микроамперметры.

Наибольшее значение силы тока, при котором стрелка прибора отклоняется на всю шкалу, называется *пределом измерения*.

Если наибольшее значение силы тока, на которое рассчитан прибор, разделить на число делений шкалы, то получим ее *цену деления*. Примеры по определению цены деления рассмотрим ниже, при рассмотрении работы конкретных измерительных приборов.

Предел измерения амперметра можно увеличить, если параллельно ему подключить резистор $R_{ш}$ небольшого сопротивления. Например, можно подобрать сопротивление этого резистора так, что через прибор пойдет только одна десятая часть тока цепи, а девять десятых пойдут по резистору $R_{ш}$ (рис. 1, б). В этом случае предел измерения увеличится в десять раз, так как нужен ток в десять раз больший, чем первоначальный, чтобы стрелка отклонилась на всю шкалу. Подобные, параллельно подключаемые, резисторы называют *шунтами*. Если использовать несколько разных шунтов, то получится многопределный амперметр.

2. Для *измерения напряжения* в цепи применяют *вольтметры*. Они имеют тот же принцип действия и конструкцию, что и амперметры. Отличие состоит в их сопротивлении и способе включения в цепь. Вольтметры включают в цепь *параллельно* тому участку, на котором измеряется напряжение (рис. 2, а). Вольтметры имеют *большое сопротивление*: чем больше сопротивление прибора, тем меньше погрешности вносится при измерении напряжения.

Для измерения малых напряжений служат *милливольтметры* и *микровольтметры*. Расширение пределов измерения вольтметров осуществляется путем последовательного подключения к ним добавочных сопротивлений - резисторов $R_{д}$ (рис. 2, б). В результате оказывается, что к зажимам вольтметра приложена только часть измеряемого напряжения, причем тем меньшая, чем больше сопротивление добавочного резистора. Например, если сопротивление добавочного резистора $R_{д}$ в 9 раз больше сопротивления прибора $R_{л}$, то 90% измеряемого напряжения будет падать на резисторе $R_{д}$, а на вольтметр будет приходиться 10%, то есть 1/10 часть измеряемого напряжения. При этом показания вольтметра нужно умножать на множитель «10» и им можно измерять напряжение в 10 раз большее, чем предел измерения прибора.

3. Для измерения *переменного тока и напряжения* могут быть использованы те же приборы, что и для измерения постоянного тока, но снабженные дополнительным выпрямительным устройством. При этом прибор фиксирует *действующее значение* переменного тока. При этом измерительный прибор имеет две шкалы: для постоянного тока и для переменного тока, причем, шкала для переменного тока не совпадает со шкалой для постоянного тока.

4. Для *измерения сопротивления* предназначены *омметры*. Они состоят из источника тока, набора резисторов и микроамперметра. Схема простейшего омметра показана на рисунке 3. При включении в цепь резистора R_x с неизвестным сопротивлением в цепи протекает ток, величина которого обратно пропорциональна сопротивлению R_x .

При бесконечно большом сопротивлении R_x (несколько мегаом) стрелка прибора практически не отклоняется, так как ток равен нулю. При нулевом со-

противлении ($R_X = 0$) сила тока наибольшая и стрелка микроамперметра отклоняется на всю шкалу. Промежуточные значения сопротивления ($0 < R_X < \infty$) вызовут отклонение стрелки омметра в пределах шкалы измерительного прибора.

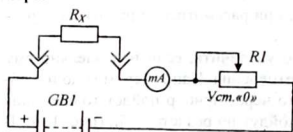


Рис. 3

Шкалу микроамперметра можно отградуировать в омах и килоомах. Причем, нуль шкалы, соответствующий максимальному току через резистор, находится в правой части шкалы и отсчет сопротивлений на шкале производится справа налево.

Особенностью омметра является то, что перед тем, как начать измерение сопротивлений, необходимо прибор «установить на нуль», коротко замкнув входные зажимы. Дело в том, что с течением времени ёмкость, то есть, электродвижущая сила источника тока, уменьшается и при нулевом сопротивлении на входе омметра стрелка микроамперметра не отклоняется на всю шкалу. Этому добиваются, уменьшая сопротивление переменного резистора $R1$ (см. рис. 3). Включая параллельно микроамперметру шунты с разным сопротивлением, можно измерять сопротивления резисторов в омах, килоомах, мегаомах.

5. *Универсальные электроизмерительные приборы* предназначены для измерения силы тока и напряжения в цепях постоянного и переменного тока, а также сопротивления. Основу таких приборов составляет микроамперметр, который вместе с набором шунтов и добавочных сопротивлений позволяет превратить прибор в амперметр, вольтметр или омметр с соответствующими пределами значений измеряемой величины. Такой прибор называют тестером или авометром (сокращение от слова «ампервольтметр»).

Тестеры выпускаются различных конструкций и назначений. В лаборатории радиоэлектроники обычно используются надежные универсальные электроизмерительные приборы АВО-5М. С помощью этого тестера можно проводить измерения основных параметров электрического тока в широких пределах (см. табл. 1).

Таблица 1

Измеряемые электрические величины	Пределы измерений
Сила постоянного тока	60 мкА, 300 мкА, 3 мА, 30 мА, 120 мА, 1,2 А, 12 А.
Напряжение постоянного тока	3 В, 12 В, 30 В, 300 В, 600 В, 1200 В.
Сила переменного тока	3 мА, 30 мА, 120 мА, 1,2 А, 12 А.
Напряжение переменного тока	3 В, 12 В, 30 В, 300 В, 600 В, 1200 В.
Сопротивление постоянному току	3 Ом – 300 Ом, 0,3 кОм – 30 кОм, 30 кОм – 3 МОм.

Прибор состоит из микроамперметра типа М24, имеющего ток полного отклонения 50 мкА, и схемы, позволяющей использовать этот прибор для указанных измерений. Для удобства отсчета прибор имеет четыре шкалы: равномерную шкалу постоянного тока и напряжения с 30 делениями, неравномерную шкалу переменного тока и напряжения (также с 30 делениями), шкалу сопротивлений и шкалу децибел, которая используется при сравнении двух напряжений (рис. 4).

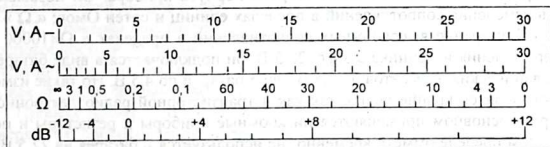


Рис. 4

На лицевой панели ампервольтметра установлены 8 клемм для подключений прибора при измерении соответствующих величин постоянного или переменного тока. Одна клемма, обозначенная «—», является общей для всех измерений, и один соединительный провод подключен к ней постоянно. Этот провод называется минусовым и имеет синий («холодный») цвет. Другая клемма, обозначенная знаком « V, r_x », используется для измерений постоянного и переменного напряжений и сопротивления, то есть для всех измерений, кроме измерения токов. Провод, присоединяемый к этой клемме, называется плюсовым и имеет красный («теплый») цвет. Остальные 6 клемм используются для подключения плюсового провода при измерении силы постоянного и переменного тока, причем выбор клемм осуществляется в зависимости от предполагаемой величины измеряемого тока.

Прибор имеет два переключателя: *переключатель рода работы* и *переключатель пределов измерений*. Переключатель рода работы может устанавливаться в положения: для измерения сопротивлений - « r_x », тока и напряжения в цепях постоянного тока - «—», тока и напряжения в цепях переменного тока - «~» и выключения прибора - «Выкл.». Установка рода работы производится до начала измерения. Во время измерения нельзя менять положение переключателя рода работы!

Переключатель пределов измерений электрических величин служит для установки нужного режима измерений и при измерении можно с помощью переключателя переходить с одного предела на другой.

На панели прибора также установлен реостат для установки тока омметра, то есть, установки на нуль стрелки прибора при измерения сопротивлений. Установка на нуль производится при положении переключателя рода работ в положении « r_x » и одного из пределов измерений: « Ω », « $\Omega \times 100$ » или « $\Omega \times 10000$ », а также накоротко замкнутых проводниках, соединенных с клеммами « V, r_x » и «—». Замыкание можно осуществить также нажатием и удерживанием в нажатом состоянии кнопки, совмещенной с ручкой реостата. Установ-

ка омметра на нуль перед началом измерения сопротивлений необходимо проводить потому, что встроенный в прибор гальванический элемент, являющийся источником измерительного тока, со временем истощается и его э.д.с. уменьшается. Поэтому через каждые 1-2 месяца работы с прибором элемент следует заменять новым.

Внутренний источник питания на 1,5 В установлен в отсеке, доступ к которому закрыт крышкой на тыльной стороне корпуса прибора. Он позволяет проводить измерения сопротивлений в пределах единиц и сотен Ом: « Ω » и « $\Omega \times 100$ ». Измерение высокоомных сопротивлений в пределах « $\Omega \times 10000$ » требует применения источника с э.д.с. 22,5 В, он подключается в виде батареи из 15 гальванических элементов по 1,5 В или 5 батарей по 4,5 В. Но такие измерения производятся крайне редко, так как в транзисторной радиоэлектронной аппаратуре в основном применяются низкоомные приборы и резисторы и поэтому на этом пределе омметр временно не используется и батарея на 22,5 В в прибор не установлена.

Перед началом измерений прибор должен быть расположен горизонтально, стрелка микроамперметра должна находиться в положении «0». В противном случае коррекцию положения стрелки осуществляет преподаватель.

При проведении измерений нужно правильно выбирать пределы измерений и правильно включать прибор в цепь. Ошибки могут привести к аварии и порче прибора и электрической цепи. Особенно опасны ошибки при измерении напряжения, когда провода оказываются случайно подключенными к клеммам, предназначенным для измерения силы тока. В этом случае вместо вольтметра параллельно нагрузке подключается амперметр, обладающий малым сопротивлением, что приведет к резкому возрастанию силы тока, протекающего через прибор, и он может сгореть.

6. Методика измерений. Ампервольтметр является незаменимым инструментом радиоинженера и учителя физики. Он позволяет проверять работоспособность дискретных радиодеталей и компонентов, проверять электрические цепи на целостность, обрывы и замыкания. Ампервольтметр позволяет проверять на работоспособность диоды, транзисторы, тиристоры и другие полупроводниковые приборы, проверять годность резисторов, катушек, трансформаторов, конденсаторов.

6.1. Проверка диодов. Работоспособность и годность полупроводникового диода проверяется с помощью омметра (рис. 5). Для этого с помощью омметра (ампервольтметра в соответствующем режиме) измеряется прямое и обратное сопротивление диода. Для полупроводникового диода прямое сопротивление должно находиться в пределах 50-200 Ом, обратное сопротивление составляет сотни килоом, и даже бесконечность.

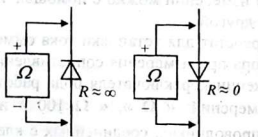


Рис. 5

Обратите внимание: при работе с омметром следует иметь в виду, что внутренний источник измерительного тока омметра включен так, что во внеш-

ней цепи ток течет в направлении от «-» к «+», то есть зажим с синим проводом является «плюсом» при проверке диодов и транзисторов.

Основными неисправностями полупроводниковых диодов являются внутренний обрыв, возникающий при перегорании $p-n$ -перехода из-за недопустимо большого тока, или короткое замыкание, возникающее вследствие пробоя и оплавления $p-n$ -перехода. В первом случае сопротивление диода в обоих направлениях бесконечно, а во втором – равно нулю или очень близко к нулю. Порядок проверки диодов показан на рисунке 5.

6.2. Проверка транзисторов. Биполярные транзисторы проверяют на работоспособность и пригодность путем проверки целостности эмиттерного и коллекторного $p-n$ -переходов, которые в простейшем случае можно рассматривать как два включенных навстречу друг другу диода (рис. 6, а, б).

Процесс проверки транзистора заключается в следующем: вначале наугад проверяются сопротивления переходов база-эмиттер и база-коллектор. При этом один зажим омметра держат постоянно присоединенным к базе, а другим зажимом поочередно касаются то коллектора, то эмиттера (рис. 7, а). Если при этом оба перехода показывают низкое сопротивление, то при перемене местами зажимов омметра (рис. 7, б) их сопротивления должны стать бесконечно большими. И наоборот, если при первом измерении оказывается, что оба $p-n$ -перехода закрыты, то при смене местами зажимов они должны быть оба открытыми. Если при этих измерениях окажется, что один из переходов закрыт, а другой открыт, то такой транзистор – неисправен.

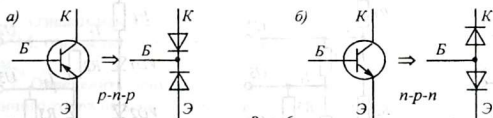


Рис. 6

Подобные измерения производят и в том случае, когда неизвестны выводы транзистора. При этом вывод базы определяется по одновременно открытому состоянию обоих $p-n$ -переходов при одном включении зажимов омметра и одновременно закрытому состоянию – при другом включении омметра. Если в трех случаях база не обнаружится, значит, транзистор неисправен.

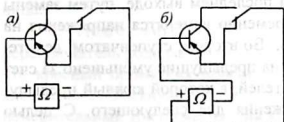


Рис. 7

Вывод эмиттера определяют путем сравнения сопротивлений эмиттерного и коллекторного $p-n$ -переходов. Дело в том, что, как правило, концентрация примесей в области эмиттера выше, чем в области коллектора и поэтому сопротивление открытого эмиттерного перехода несколько меньше, чем сопротивление открытого коллекторного перехода. Сопротивления открытых $p-n$ -переходов имеют величину порядка единиц и десятков ом.

Исправность диодов и транзисторов можно проверять, не выпаивая их из схемы, но, отключив питание. При этом необходимо учитывать наличие обходных путей для протекания измерительного тока омметра через другие цепи.

2. Схема установки для исследования

Для измерения токов, напряжений и сопротивлений с помощью ампервольтметра предлагаются схемы линейных и нелинейных делителей напряжения (рис. 8). В первом делителе общее сопротивление равно $R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$.

Если на вход этого простейшего делителя подать напряжение U_0 , напряжения на его выходах будут равны:

$$U_1 = U_0, \quad U_2 = \frac{R_2 + R_3 + R_4}{R} \cdot U_0, \quad U_3 = \frac{R_3 + R_4}{R} \cdot U_0, \quad U_4 = \frac{R_4}{R} \cdot U_0.$$

Если в данном делителе все резисторы выбраны одинаковыми, то выходные напряжения делителя должны относиться, как 4 : 3 : 2 : 1. Если при этом на вход делителя подать напряжение $U_{вх} = 5$ В, то выходные напряжения будут равны 5 В, 3,75 В, 2,5 В, 1,25 В.

При измерениях напряжения на выходах делителя сопротивление прибора $R_{л}$ вносит в результаты измерений систематические ошибки, которые можно учесть, производя соответствующие расчеты.

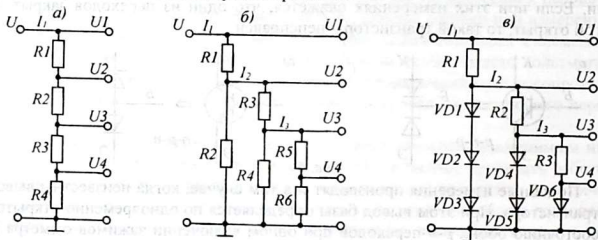


Рис. 8

Недостатком данного делителя напряжения является то, что если возникнет необходимость изменить напряжение на последнем выходе, путем замены резистора R_4 на другой резистор, то одновременно изменятся напряжения на всех остальных выходах, начиная со второго. Во втором, ступенчатом, делителе взаимное влияние последующих выходов на предыдущие уменьшено за счет того, что вся схема состоит из цепочки делителей, в которой каждый предыдущий делитель является источником напряжения для следующего. С целью уменьшения влияния последующих ступеней делителя на предыдущие сопротивления резисторов от ступени к ступени увеличивают примерно на один порядок (в 10 раз).

При изменении входного напряжения в такой же пропорции изменяются напряжения на всех выходах. Например, если входное напряжение уменьшилось на 10%, то на всех выходах одновременно напряжение уменьшится на

столько же. На нелинейном делителе, содержащем полупроводниковые диоды, например, стабилитроны, выходные напряжения практически не зависят от величины входного напряжения и от изменений в последующих ступенях. Здесь важно условие, чтобы входное напряжение было больше ожидаемого выходного напряжения.

В схеме нелинейного делителя в установке использованы кремниевые диоды. При прямом включении, за счет наличия потенциального барьера, падение напряжения на открытом *p-n*-переходе кремниевого диода составляет 0,5...0,7 В. С возрастанием тока сопротивление *p-n*-перехода уменьшается и напряжение на диоде изменяется незначительно.

В схемах делителей предусмотрены контакты и контактные гнезда для подключения приборов и переключек при измерениях токов, напряжений и сопротивлений.

3. Оборудование и приборы

1. Ампервольтметр АВО-5М.
2. Источник питания ИЭПП-1 или ИПД-1.
3. Макет с делителями напряжения.
4. Набор диодов и транзисторов.
5. Соединительные провода и переключки.

4. Эксперименты и измерения

1. Ознакомиться с конструкцией универсального измерительного прибора АВО-5М, определить положение и назначение клемм и ручек управления прибором.

2. Определить цену деления шкалы миллиамперметра постоянного и переменного токов на всех пределах измерения токов (см. рис. 4).

3. Определить цену деления шкалы вольтметра постоянного и переменного токов на всех пределах измерения напряжения.

4. Определить цену деления шкалы омметра на участках от 3 до 4 Ом, от 4 до 20 Ом, от 20 до 40 Ом, от 40 до 60 Ом, от 60 до 100 Ом, от 100 до 200 Ом и так до конца шкалы. При этом можно воспользоваться рисунком 4.

5. Зарисовать в тетради три схемы делителей, по одной на каждой странице.

6. Подготовить прибор для измерения сопротивлений. Установить переключатель рода работ на « r_x » а пределы измерений – на « Ω ». Проверить, что красный проводник присоединен к клемме « V, r_x », а синий проводник к клемме «—». Замкнув их между собой, с помощью ручки реостата установить измерительный ток омметра, при котором стрелка омметра показывает «0».

7. Измерить и записать в тетрадь сопротивления всех резисторов делителей, указав номер делителя и номер каждого резистора. Предварительно проследить, чтобы все переключки в делителях были разомкнуты. Найденные значения сопротивлений записать против соответствующих резисторов на принципиальных схемах согласно ЕСКД.

8. Подготовить прибор для измерения напряжений, установив переключатель рода работ в положение «—», а предел измерений «12 В». Привести в рабочее состояние делители, замкнув переключки короткими проводниками.

9. Подключить питание, установив входное напряжение 5 В. Измерить и записать значения напряжений U_1, U_2, U_3, U_4 в соответствующих точках на принципиальных схемах. Если напряжение в измеряемой точке меньше 3 В, переключатель пределов измерения переключить в положение «3 В». (При отсчете показаний прибора не перепутать шкалу постоянного тока со шкалой переменного тока!).

10. Подготовить прибор для измерения постоянного тока. Для этого, оставив переключатель рода работ в положении «—», перевести переключатель пределов измерений в положение «120 мА; 1,2 А; 12 А», а красный (плюсовой) провод присоединить к клемме «+мА; μ А». На установке замкнуть все переключки.

Включить питание и для каждого из делителей провести измерения токов I_1, I_2, I_3 , то есть, токи через делитель и через его отдельные ветви. Измеритель тока включается в разрыв цепи, поэтому на участке, где должна измеряться сила тока, переключку предварительно следует убрать, а после измерения переключку восстановить. На принципиальных схемах записать значения токов в точках измерения.

11. На основании результатов измерений вычислить токи через резисторы R_2, R_4 и R_6 делителя 2 и токи через диоды VD_1, VD_4 , и VD_6 делителя 3.

12. С помощью ампервольтметра проверить на работоспособность предложенные диоды и транзисторы, найти выводы анода и катода (для диода) и выводы базы, коллектора и эмиттера (для транзистора).

Зарисовать внешний вид и цоколевку неизвестного диода и транзистора.

5. Указания к отчету

Отчет должен содержать следующие материалы:

1. Наименование и цель работы.
2. Схемы делителей напряжения с указанием сопротивлений всех резисторов, а также токов и напряжений в ветвях и узлах схем.
3. Расчеты напряжений во втором делителе.
4. Цоколевку неизвестного диода и транзистора (см. приложения).
5. Ответы на контрольные вопросы.

6. Контрольные вопросы

1. Должен ли учитель физики и инженер уметь пользоваться электроизмерительными приборами?
2. Какие основные электроизмерительные приборы вы знаете?
3. Как включаются в цепь амперметр и вольтметр?
4. Каково назначение шунта и добавочного сопротивления?
5. Из каких частей состоит простейший омметр?
6. Какие электрические величины можно измерить с помощью ампервольтметра?

7. Чем отличаются шкала постоянного и переменного тока?
8. Как определяется цена деления шкалы измерительного прибора?
9. При каком неправильном включении прибор может сгореть?
10. Что такое систематическая погрешность?
11. Можно ли по цвету проводов узнать, с каким зажимом прибора он соединен?
12. Как проверить работоспособность полупроводникового диода?
13. Как проверить транзистор и как найти его базу?

7. Литература

1. Винокуров В.И., Каплин С.И., Петелин И.Г. Электрорадиоизмерения: Учеб. пособие для радиотехн. спец. вузов / Под ред. В.И.Винокурова. – 2-е изд. – М.: Высш. шк., 1986.
2. Котур В.И. и др. Электрические измерения и электроизмерительные приборы: Учебник для техникумов / В.И.Котур и др. – М.: Энергоатомиздат, 1986.



Рис. 10

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТЫХ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Цель работы:

1. Изучить процессы, протекающие в линейных RC - и RL -цепях и познакомиться с их фильтрующими свойствами.
2. Научиться рассчитывать и определять полосу пропускания и частоту среза простейших частотных RC -фильтров.

Содержание работы:

1. Исследование амплитудно-частотных характеристик простых и сложных RC -фильтров

1. Краткие теоретические сведения

Линейными элементами называются элементы, подчиняющиеся закону Ома, у этих элементов зависимость тока от напряжения представляет собой линейную функцию (график $U(I)$ – прямая линия). Линейными элементами являются резисторы, катушки индуктивности и конденсаторы – R , L и C . Цепи, состоящие только из линейных элементов, называются линейными цепями. Линейные RC -, RL -, LC - и RCL -цепи применяются в качестве фильтров, фазовращателей, цепей задержки сигналов, дифференцирования и интегрирования электрических сигналов.

Элементы линейных цепей включаются так, что они образуют четырехполюсник с двумя входными и двумя выходными выводами (рис. 1). Основным параметром четырехполюсника является *коэффициент передачи* по напряжению и току: $K_U = \frac{U_2}{U_1}$ и $K_I = \frac{I_2}{I_1}$.

Учитывая, что реактивные сопротивления катушек индуктивности и конденсаторов зависят от частоты и прохождение переменного тока через них связано со сдвигом фазы, рассматривают амплитудно-частотную и фазочастотную характеристики четырехполюсников: $K(\omega) = \frac{U_{m2}}{U_{m1}}$ и $\varphi(\omega) = \alpha_2 - \alpha_1$. Иногда амплитудно-частотную характеристику называют *передаточной* характеристикой.

Поскольку коэффициент передачи RC - и RL -цепей на одних частотах имеет большое значение, а на других частотах – меньшее значение, это означает, что они обладают свойствами фильтра – способностью хорошо пропускать одни сигналы и не пропускать другие.

Коэффициент передачи идеального фильтра имеет только два значения: $K = 1$ или $K = 0$. В первом случае говорят, что фильтр прозрачен, то есть $U_2 = U_1$, и сигнал проходит без ослабления. Во втором случае считают фильтр непрозрачным, то есть $U_2 = 0$, и сигнал совершенно не проходит. Частота, при которой состояние фильтра переходит от прозрачности к непрозрачности или на-

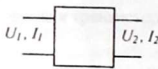


Рис. 1

оборот, называется *частотой среза* ω_{cp} . Интервал частот, в пределах которого фильтр прозрачен, называется *полосой пропускания* фильтра.

Существует 5 видов фильтров:

1) *фильтр нижних частот* с полосой пропускания от 0 до ω_{cp} ;

2) *фильтр верхних частот* с полосой пропускания от ω_{cp} до бесконечности;

3) *полосовой фильтр* с полосой пропускания от ω_{cp1} до ω_{cp2} ;

4) *избирательный фильтр*, прозрачный для одного сигнала с частотой ω_0 ;

5) *заградительный фильтр*, прозрачный для всех сигналов, кроме сигнала с частотой ω_0 .

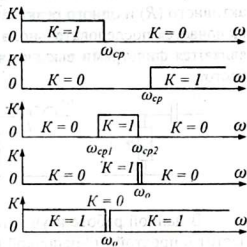


Рис. 2

Амплитудно-частотные (передаточные) характеристики этих фильтров приведены на рисунке 2.

2. Схемы исследования

Реальные фильтры имеют амплитудно-частотные характеристики, имеющие прямоугольную форму. В этом случае полоса пропускания определяется интервалом частот, в пределах которого цепь пропускает не менее половины максимально возможной мощности, то есть, $P_2 \geq \frac{1}{2} P_{2max}$. Частота среза определяется через условие $P_2 = \frac{1}{2} P_{2max}$, то есть, $\frac{P_2}{P_{2max}} = \frac{1}{2}$

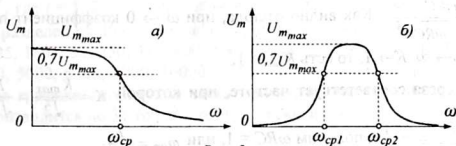


Рис. 3

Так как мощность сигнала пропорциональна квадрату напряжения

$$P = \frac{U^2}{R}, \text{ тогда } \frac{P_2}{P_{max}} = \frac{\frac{U_2^2}{R}}{\frac{U_{max}^2}{R}} = \frac{U_2^2}{U_{max}^2} = \left(\frac{U_2}{U_{max}} \right)^2 = \frac{1}{2}, \text{ отсюда для точки среза}$$

$K_{cp} = \frac{U_2}{U_m} = \frac{1}{\sqrt{2}}$ или $U_2 = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$. Учитывая что $\frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{2}}{2} = \frac{1,41}{2} \approx 0,7$, частоту среза определяют как частоту, соответствующую точке на амплитудно-

частотной характеристике, находящейся на уровне 0,7 максимального значения максимальной амплитуды $U_{m_{max}}$, то есть, на уровне $U_m = 0,7 U_{m_{max}}$ (рис. 3).

Простейшие RC - и RL -цепи состоят только из двух элементов – одного активного (R) и одного реактивного элемента (C или L). При этом один элемент включается последовательно, а другой – параллельно (рис. 4). Цепочки a и $г$ являются фильтрами высших частот, а цепочки $б$ и $в$ – фильтрами низших частот.

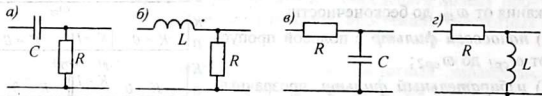


Рис. 4

В данной работе изучаются только RC -цепи. Рассмотрим фильтр высших частот с простой RC -цепочкой (рис. 4, a). Выходным напряжением этого четырехполюсника является напряжение, создаваемое током, протекающим через резистор R (рис. 5). Этот ток можно определить, как ток, создаваемый напряжением U_1 через соединенные последовательно резистор R и конденсатор C . Их общее сопротивление Z можно найти по формуле $Z = \sqrt{R^2 + (X_C)^2}$, где X_C – реактивное сопротивление конденсатора: $X_C = \frac{1}{j\omega C}$ (в комплексной форме).

Ток $I = \frac{U_1}{\sqrt{R^2 + (\frac{1}{\omega C})^2}}$ или $I = \frac{\omega C}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} \cdot U_1$. Выходное напряжение

$U_2 = I \cdot R = \frac{\omega RC}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} \cdot U_1$. Отсюда коэффициент передачи этой RC -цепочки

$K = \frac{U_2}{U_1} = \frac{\omega RC}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}$. Как видно отсюда, при $\omega \rightarrow 0$ коэффициент передачи

$K \rightarrow 0$, а при $\omega \rightarrow \infty$ $K \rightarrow 1$, то есть $K_{max} = 1$.

Частота среза соответствует частоте, при которой $K = \frac{K_{max}}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}}$. Под-

ставив $\frac{\omega RC}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}}$, получим $\omega RC = 1$, или $\omega_{cp} = \frac{1}{RC}$.

Сдвиг фазы выходного напряжения относительно входного можно найти из соотношения $tg \phi = \frac{X_C}{R}$. Учитывая характер емкостного сопротивления (знак

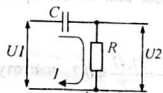


Рис. 5

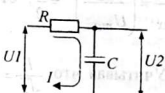


Рис. 6

«минус») можно записать:

$\phi = \arctg(-\frac{1}{\omega RC})$. Это говорит о том, что выходное напряжение отстает по фазе на угол ϕ относительно входного напряжения.

Аналогично для фильтра низших частот с интегрирующей RC -цепочкой (рис. 6) можно вывести формулы для вычисления K , ω_{cp} и φ :

$$K = \frac{U_2}{U_1} = \frac{I}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}; \quad \omega_{cp} = \frac{1}{RC}; \quad \varphi = \arctg(\omega RC).$$

Обратите внимание, что для обоих фильтров частота среза одна и та же: $\omega_{cp} = \frac{1}{RC}$. Величина $\tau = RC$ называется постоянной времени RC -цепи и имеет размерность времени — с.

На практике, особенно в схемах генераторов и избирательных усилителей часто применяются **сложные RC -фильтры**, состоящие из нескольких простых RC -звеньев. Это **мост Вина** (рис. 7) и **двойной $2T$ -мост** (рис. 8).

Как видно из рисунков, мост Вина состоит из двух RC -цепочек (рис. 4, а, в), а $2T$ -мост состоит их четырех RC -цепочек: двух цепочек (рис. 4, а) и двух цепочек (рис. 4, в).

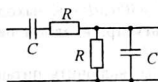


Рис. 7

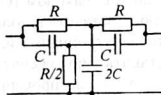


Рис. 8

Передаточные характеристики этих фильтров имеют сложную форму, а расчет таких фильтров достаточно сложен. Поэтому на практике такие фильтры часто строят из конденсаторов и резисторов одинаковых номиналов. При этом фильтры имеют максимум или минимум на частоте $\omega_0 = 1/RC$. Амплитудно-частотные характеристики этих фильтров должны быть построены в процессе выполнения данной лабораторной работы.

Учитывая, что чувствительность человеческого слуха по громкости и частоте имеет логарифмический характер, частоты выбраны по формуле $f_i = 10^{0,1i}$, где $i = 1, 2, 3, \dots$. При этом весь диапазон звуковых частот от 20 Гц до 20 кГц разделен на 30 частей следующими частотами: 20, 25, 31, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3150, 4000, 5000, 6300, 8000, 10000, 12500, 16000, 20000 Гц (рис. 9). Поэтому построение графика амплитудно-частотной характеристики фильтра звуковых частот производится по 31 точкам, расположенным через равные промежутки.

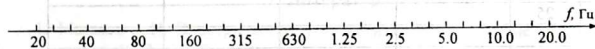


Рис. 9

Примечание Число измерений можно сократить, измеряя только на тех частотах, вблизи которых выходное напряжение цепи изменяется заметно и резко.

3. Оборудование и приборы

1. Макет с четырьмя низкочастотными RC -фильтрами.
2. Генератор звуковой частоты ГЗ-18 (или ЗГ-2А).
3. Милливольтметр переменного тока ВЗ-38 (или ВЗ-5Т).
4. Соединительные провода.

4. Выполнение работы

1. Зарисовать с макета схемы простых RC -фильтров низших и высших частот, а также двойного $2T$ -моста и моста Вина, с указанием номиналов резисторов и конденсаторов (крупногабаритные детали могут быть расположены на обратной стороне платы).

2. Рассчитать частоту среза и записать полосу пропускания (в герцах) для простых RC -фильтров и записать рядом с соответствующими схемами. Кроме того, для указанных фильтров рассчитать углы сдвига фаз на частотах 20 Гц и 20 кГц.

3. Рассчитать частоты максимума и минимума для мостовых фильтров и записать рядом с их схемой.

4. Собрать схему исследования, соединив вход исследуемого четырехполюсника с выходом генератора звуковой частоты. Выходной attenuator генератора поставить в положение «300 мВ». К выходу четырехполюсника подключить электронный милливольтметр, входной переключатель которого также поставить в положение «300 мВ».

5. После проверки схемы, включить питание генератора и милливольтметра. Плавно изменяя частоту генератора, убедиться, что фильтр работает и милливольтметр не зашкаливает во всем диапазоне частот от 20 Гц до 20 кГц.

6. Установить на генераторе частоту, при которой милливольтметр показывает максимальное выходное напряжение на выходе фильтра. Уменьшить выходное напряжение генератора так, чтобы переключить пределы измерений милливольтметра на «100 мВ». Изменяя выходное напряжение генератора добиться, чтобы стрелка милливольтметра установилась в конце шкалы против деления «100 мВ». Записать входное и максимальное выходное напряжение фильтра $U_{вх}$, $U_{вых, макс}$.

7. Плавно изменяя частоту генератора, установить частоту генератора, при которой выходное напряжение фильтра равно 70 мВ ($0,7U_{вых, макс}$). Отметить частоту среза фильтра $f_{ср}$.

Таблица 1

№ изм.	Частота, Гц	Измерения			
		ФВЧ	ФНЧ	Мост Вина	2Т-мост
1	20				
2	25				
3	31				
4	40				
5	50				
6	63				
...	...				
31	20 кГц				

8. Снять амплитудно-частотную характеристику выбранного фильтра, заполняя таблицу I. Для этого потребуется таблица, которая содержит 31 строку.

9. Аналогичные измерения провести для оставшихся схем, повторяя действия, описанные в пп. 4-8.

10. Выключить питание и разобрать схему. Построить амплитудно-частотные характеристики на одном рисунке, желательно разным цветом.

11. По передаточным характеристикам определить полосу пропускания (интервалы прозрачности) исследованных RC -фильтров и сравнить их с вычисленными теоретически.

5. Указания к отчету

Отчет должен содержать следующие материалы:

1. Наименование и цель работы.
2. Схемы простейших RC - и LC -фильтров.
3. Схемы моста Вина и $2T$ -моста.
4. Таблицы измерений.
5. Амплитудно-частотные характеристики фильтров.
6. Ответы на контрольные вопросы.

6. Контрольные вопросы

1. Что такое «линейный элемент»?
2. Какие электрические цепи называются линейными?
3. Какую цепь называют «четыреполюсником»?
4. Что такое «коэффициент передачи»?
5. Что представляет собой амплитудно-частотная характеристика четырехполюсника?
6. Что такое «фильтр»?
7. Перечислите виды частотных фильтров.
8. Что такое «частота среза»?
9. По какому признаку определяют частоту среза реального фильтра?
10. Как вычислить частоту среза простого RC -фильтра?
11. Что такое «полоса пропускания» фильтра?
12. Как определяется полоса пропускания реального фильтра?
13. Почему для снятия амплитудно-частотной характеристики фильтров используется логарифмическая шкала частот?

7. Литература

1. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм. Учеб. пособие. – М.: Высш. школа, 1983, с. 377 – 380.
2. Гершензон Е.М. и др. Радиотехника учеб. пособие для педвузов - М.: Просвещение, 1986.
3. Манаев Е.И. Основы радиозлектроники. – М.: Радио и связь, 1985.
4. Изюмов Н.М., Линде Д.П. Основы радиотехники. - М.: Гос. энерг. изд., 1959, с. 87 - 100.

ИЗМЕРЕНИЕ ИНДУКТИВНОСТЕЙ И ЕМКОСТЕЙ
РЕЗОНАНСНЫМИ МЕТОДАМИ

Цель
работы:

1. Научиться измерять параметры контуров резонансными методами с помощью Q -метра.
2. Научиться измерять электрические величины с помощью мостов постоянного и переменного тока.

Содержание
работы:

1. Измерение сопротивлений, индуктивностей и емкостей, а также частоты свободных колебаний и добротности контура.

1. Краткие теоретические сведения

1.1. Измерение сопротивления, индуктивности и емкости с помощью моста постоянного и переменного тока.

Мостовой метод измерений относится к нулевым методам. В истории развития техники точных измерений нулевой метод является одним из первых. Взвешивание грузов на рычажных весах (как равноплечих, так и неравноплечих) - это характерный пример нулевого метода измерения.

В общем виде нулевой метод заключается в следующем. Измеряемую величину сравнивают с эталонной величиной, значение которой известно с высокой точностью. Последнюю выбирают таким образом, чтобы разность между измеряемой и известной величинами равнялась нулю. Совпадение значений этих величин отмечают при помощи нулевого указателя (нуль-индикатора).

В электрических измерениях широко применяются мосты для измерения сопротивления, индуктивности и емкости. На рис. 1 показана схема моста для измерения сопротивления R_x . Схема состоит из четырех сопротивлений с известными значениями $R1, R2, R3, R4$, нулевого индикатора - гальванометра (PA) и источника тока GB . Измеряемое сопротивление R_x включают вместо одного из сопротивлений, например, вместо $R1$.

Изменяя сопротивление одного из элементов моста, например $R2$, добиваются, чтобы указатель гальванометра стал как можно ближе к нулю. Это возможно только тогда, когда между точками 2 - 4 нет напряжения, то есть, потенциалы точек 2 и 4 равны, другими словами, падение напряжения между точками 1 - 2, равно падению напряжения между точками 1 - 4, то есть, напряжение U_{1-2} равно напряжению U_{1-4} .

Как следствие этого, падения напряжения между точками 2 - 3 и 4 - 3 будут также равны между собой, то есть $U_{2-3} = U_{4-3}$.

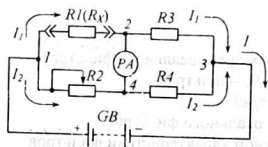


Рис. 1

Так как ток через гальванометр равен нулю, то через R_x и R_3 протекает один и тот же ток I_1 , а через сопротивления R_2 и R_4 протекает ток I_2 . Из равенства напряжений

$$U_{1-2} = I_1 \cdot R_x = I_2 \cdot R_2 \quad \text{и} \quad U_{2-3} = I_1 \cdot R_3 = I_2 \cdot R_4$$

$$\text{следует: } \begin{cases} I_1 \cdot R_x = I_2 \cdot R_2 \\ I_1 \cdot R_3 = I_2 \cdot R_4 \end{cases}$$

Разделив первое равенство на второе, получим: $R_x / R_3 = R_2 / R_4$, откуда

$$R_x = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_4}.$$

Чтобы результат измерения был точным, необходимо, чтобы значения сопротивлений R_2 , R_3 , R_4 были высокоточными. Такие величины называют *эталонными*. Эталонные величины могут быть постоянными или переменными, но с очень точной шкалой, для установки требуемой величины.

Если мост неуравновешен и сопротивления не пропорциональны, через индикатор течет ток одного или другого направления и стрелка отклоняется влево или вправо. Медленно регулируя сопротивление эталонного резистора, добиваются, чтобы отклонение стрелки от середины шкалы было наименьшим.

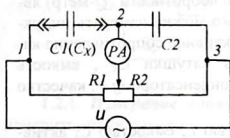


Рис. 2

Мост переменного тока питается переменным током и может состоять из 4 конденсаторов или из 4 катушек индуктивности, но чаще всего в

мосту переменного тока реактивными элементами одного характера являются только два элемента $C1(C_x)$ и эталонный $C2$ (или $L1(L_x)$ и эталонный $L2$), а два элемента моста являются эталонными резисторами $R1$ и $R2$ (рис. 2). Дело в том, что для измерения важны не значения сопротивлений $R1$ и $R2$, а их отношение, то есть $m = R1 / R2$. Тогда $C_x = m \cdot C2$ или $L_x = m \cdot L2$. Поэтому два эталонных резистора $R1$ и $R2$ выполнены в виде прецизионного (высокоточного) потенциометра. При перемещении ползунка влево сопротивление $R1$ уменьшается и ровно настолько же увеличивается сопротивление $R2$. Шкала потенциометра проградуирована непосредственно в значениях множителя m .

Универсальный мост RLC «Тесла» позволяет производить точные измерения сопротивления, емкости и индуктивности. Для всех измерений прибор имеет один общий вход « X_{RLC} » и настройка прибора на измерение соответствующей величины осуществляется с помощью переключателя вида измеряемой величины: « R », « C », « L_S », « L_P ». Для измерения сопротивлений используется мост постоянного тока, а измерение емкостей и индуктивностей осуществляется мостом переменного тока. Поэтому прибор имеет переключатель режимов работы: как моста постоянного тока « DC » и переменного тока « AC ». В положении « OFF » мост не работает, но остается включенным.

Мост имеет: магазин сопротивлений — от 0,1 Ом до 10 МОм;

магазин емкостей — от 10 пкФ до 10 мкФ;

магазин индуктивностей — от 0,1 мГн до 100 Гн.

В зависимости от положения переключателя вида измеряемой величины « R », « C », « L_S » или « L_P » автоматически подключается соответствующий магазин эталонов.

Балансировка моста осуществляется с помощью ручки, связанной со шкалой множителя. Процесс уравнивания моста контролируется с помощью нуль-индикатора (микроамперметра с нулем в середине шкалы). Чувствительность индикатора регулируется ручкой «*Sensibility*». В начале измерения устанавливают самую низкую чувствительность, а по мере приближения к равновесию чувствительность индикатора повышают.

Процесс измерения R , C и L осуществляется одинаково, то есть, после уравнивания моста результат измерения определяют как произведение соответствующей эталонной величины на множитель m : $R = m \cdot R_{ЭТ}$ ($C = m \cdot C_{ЭТ}$, $L = m \cdot L_{ЭТ}$).

1.2. Измерение индуктивностей и емкостей резонансными методами.

Явление последовательного резонанса в колебательном контуре лежит в основе работы измерителей добротности. Измеритель добротности (Q -метр) является универсальным прибором, с помощью которого можно измерять индуктивность катушки L , ее качество (добротность) Q_L , активное сопротивление катушки R_L , собственную (межвитковую) емкость катушки C_L , емкость конденсатора C , тангенс угла потерь диэлектрика в конденсаторе $\text{tg } \delta$, качество (добротность) контура Q_k .

Колебательный контур обладает индуктивностью L , емкостью C , активным сопротивлением потерь R , собственной частотой ω_0 , то есть частотой свободных колебаний $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, волновым сопротивлением ρ , то есть сопротивлением конденсатора или катушки, измеренным на частоте свободных колебаний ($\rho = \omega_0 \cdot L$ или $\rho = \frac{1}{\omega_0 C}$ или $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$) и добротностью Q — отношением вол-

нового сопротивления ρ к активному сопротивлению потерь R : $Q = \frac{\rho}{R}$. Чтобы повысить добротность (качество) колебательного контура, катушки наматывают толстым медным проводом с серебряным или золотым покрытием, конденсаторы изготавливают с высококачественным диэлектриком.

Так как Q -метр представляет собой устройство, содержащее генератор переменного напряжения с малым внутренним сопротивлением r , то практически любая подключаемая цепь, составленная из L , R , C , имеет сопротивление намного больше, чем внутреннее сопротивление генератора. При этом выходное напряжение генератора U_r принимается (с достаточной степенью точности) равным его электродвижущей силе E , поэтому можно считать, что добротность контура (катушки) определяется отношением напряжения U_C на эталонном конденсаторе $C_{ЭТ}$ к выходному напряжению генератора U_r .

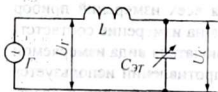


Рис. 3

(рис. 3), то есть, $Q = \frac{U_C}{U_I}$. При резонансе напряжения $U_C \gg U_I$, поэтому добротность катушки измеряется десятками и сотнями. Следует иметь в виду, что при последовательном резонансе напряжения на обкладках конденсатора и на выводах катушки всегда равны, то есть $U_L = U_C$. Поэтому достаточно измерять напряжение на конденсаторе U_C .

На рисунке 4 представлена электрическая схема измерительного контура. К клеммам 1, 2 этого контура подключаются либо исследуемые катушки L_X , либо эталонные катушки $L_{ЭТ}$. Параллельно эталонному конденсатору $C_{ЭТ}$ подключаются исследуемые конденсаторы C_X (клеммы 3, 4). Резонансное напряжение на $C_{ЭТ}$ измеряется микроамперметром, проградуированным в единицах добротности. Ток в контуре устанавливается делителем напряжения «множитель Q ».

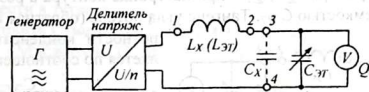


Рис. 4

1.2.1. **Измерение параметров катушки.** Индуктивность катушки можно измерить, подключив ее к клеммам 1, 2 (рис. 4). Настроив контур $L_X C_{ЭТ}$ в резонанс конденсатором $C_{ЭТ}$ на заданной частоте f , можно определить величину индуктивности по формуле, вытекающей из известной формулы Томсона:

$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$; $L_X = \frac{1}{4\pi^2 f^2 C_{ЭТ}}$, где $C_{ЭТ}$ — емкость эталонного конденсатора, от-

считанная по шкале, f — частота генератора (Гц).

Если паразитная емкость C_L катушки значительна, то контур следует настраивать на двух различных частотах генератора f_1 и f_2 . Тогда индуктивность катушки L_X можно определить по формуле:

$$L_X = \frac{1 - \left(\frac{f_1}{f_2}\right)^2}{4\pi^2 f_1^2 (C_{ЭТ1} - C_{ЭТ2})}, \text{ где } C_{ЭТ1} \text{ и } C_{ЭТ2} - \text{емкость эталонного}$$

конденсатора контура, настроенного на частоты f_1 и f_2 .

Межвитковая емкость катушки C_L определяется по данным предыдущих измерений для L_X по формуле:

$$C_L = \frac{C_{ЭТ2} - C_{ЭТ1} \left(\frac{f_1}{f_2}\right)^2}{\left(\frac{f_1}{f_2}\right)^2 - 1}$$

Для измерения добротности катушки Q_L контур, состоящий из измеряемой катушки L_X и эталонного конденсатора $C_{ЭТ}$, настраивают в резонанс на заданной

частоте эталонным конденсатором. В этом случае напряжение на конденсаторе будет в Q раз больше чем э.д.с. генератора. Это напряжение фиксируется прибором « Q ». Тогда величина добротности определяется по формуле: $Q_L = kQ$, k – показание прибора по шкале «Множитель Q ».

1.2.2. Измерение параметров конденсатора. Емкость конденсатора C_X определяется Q -метром следующим образом: К клеммам 1, 2 подключается эталонная катушка $L_{Э1}$ и устанавливается частота генератора, равная резонансной частоте контура (при наибольшей эталонной емкости $C_{Э11}$). Затем к клеммам 3, 4 подключается измеряемый конденсатор C_X (рис. 5). Уменьшая емкость эталонного конденсатора, добиваются резонанса на той же частоте. В этом случае емкость эталонного конденсатора будет $C_{Э12}$. Тогда величина измеряемой емкости определяется как разность емкостей по формуле: $C_X = C_{Э11} - C_{Э12}$

Тангенс угла потерь конденсатора определяется при измерении емкости C_X по показаниям прибора « Q », Q_1 – при настройке контура в резонанс с емкостью $C_{Э11}$ и Q_2 – с емкостью $C_{Э12}$. Тангенс угла потерь (обратная величина добротности конденсатора) определяется по соотношению:

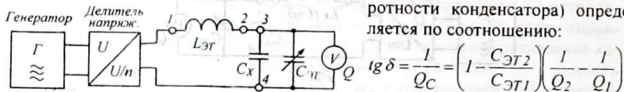


Рис. 5

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{Q_C} = \left(1 - \frac{C_{Э12}}{C_{Э11}}\right) \left(\frac{1}{Q_2} - \frac{1}{Q_1}\right)$$

1.2.3. Измерение параметров контура. Для определения добротности контура, состоящего из катушки индуктивности L_X и емкости C_X , их следует подключить к прибору раздельно к соответствующим клеммам 1, 2 и 3, 4. При этом эталонный конденсатор устанавливается на минимум. Частоту генератора установить равной резонансной частоте контура. Добротность контура определяется по формуле: $Q_K = kQ$.

2. Оборудование и приборы

1. Измерительный мост «TESLA».
2. Измеритель добротности (Q -метр) E-9-1.
3. Ампервольтметр АВО-5.
4. Набор резисторов, конденсаторов и катушек.
5. Соединительные провода.

3. Выполнение работы

1. Измерить сопротивления 2-3 резисторов (по указанию преподавателя) с помощью моста постоянного тока. Для этого включить питание прибора «Тесла». Установить вид измеряемой величины « R » и режим моста постоянного тока « DC ». Чувствительность нуль-индикатора установить на минимум, вращая ручку «*Sensitivity*» влево, против часовой стрелки.

Подключить к входу « X_{RLC} » резистор R_X , сопротивление которого нужно измерить. Установить переключатель магазина на один из эталонных сопротивлений, близкий к ожидаемому результату измерения.

2. Вращая ручку множителя, следить за стрелкой нуль-индикатора. Если стрелка индикатора приближается к середине шкалы (к нулю), то это означает, что мост приближается к состоянию равновесия. Если стрелка удаляется от центра, ручку множителя нужно вращать в обратную сторону. Постепенно увеличивая чувствительность индикатора, уравновесить мост и вычислить измеряемое сопротивление $R_X = m \cdot R_{ЭТ}$.

Повторить измерение этого же сопротивления R_X с помощью омметра. Результаты обоих измерений занести в тетрадь.

3. Провести измерения емкости 2-3 конденсаторов (по указанию преподавателя). Для этого перевести переключатель режима работы прибора в режим моста переменного тока (положение «АС») и переключатель вида измеряемой величины в положение «С». К входу « $X_{R,L,C}$ » подключить исследуемый конденсатор. Подбирая эталонные емкости и изменяя множитель, уравновесить мост и вычислить емкость конденсатора по формуле $C_X = m \cdot C_{ЭТ}$. Результаты занести в тетрадь.

4. Подготовить Q-метр к работе. Для этого необходимо:

1) Ручку «Множитель Q грубо» повернуть против часовой стрелки до упора.

2) Измеряемую катушку L_X подключить к левой паре клемм, находящихся на верхней панели прибора.

3) Переключатель диапазонов поставить на требуемый поддиапазон и по шкале частот установить нужную частоту генератора.

4) Включить питание (при этом должна загореться индикаторная лампочка) и дать прогреться прибору в течение 1-2 минут.

5) Установить стрелку прибора «Q» на нуль с помощью ручки «Уст. нуля».

6) Установить величину тока нагрузочного сопротивления в положение «1» по шкале «Множ. Q», вначале ручкой «Множ. Q грубо», а затем ручкой «Множ. Q плавно».

7) Настроить колебательный контур в резонанс на заданной частоте, изменяя емкость эталонного конденсатора (по наибольшим показаниям прибора «Q»).

8) Дополнительно отрегулировать (если необходимо) величину тока ручками «Множ. Q грубо» и «Множ. Q плавно» по шкале прибора «Множ. Q», так, чтобы удобно было определять величину по шкале прибора «Q».

9) Сделать несколько пробных измерений параметров эталонных катушек и конденсаторов с известными номиналами.

5. Измерить параметры катушки с неизвестными параметрами (L_X). Катушка выбирается по усмотрению преподавателя. Результаты проверить с помощью моста и записать в отчет.

6. Измерить параметры конденсаторов с неизвестными параметрами (C_X , $tg\delta_X$). Результаты проверить с помощью моста «TESLA» и внести в отчет.

7. Составить колебательный контур из проверенных деталей и измерить его резонансную частоту и добротность.

4. Указания к отчету

Отчет должен содержать:

1. Схемы мостов постоянного и переменного тока.
2. Блок-схему измерителя добротности.
3. Результаты измерений R_x , L_x , C_x .
4. Ответы на контрольные вопросы.

5. Контрольные вопросы

1. В чем сущность «нулевого» метода измерений?
2. Из каких частей состоит мост постоянного тока?
3. Чем отличается мост переменного тока от моста постоянного тока?
4. Что такое «эталонное сопротивление»?
5. По какой формуле вычисляют результат измерения с помощью моста?
6. Что такое резонанс?
7. Виды резонанса в колебательных контурах.
8. Как изменяется ток в контуре, сопротивление контура и напряжения на выводах катушки и обкладках конденсатора при резонансе в последовательном контуре?
9. Как с изменением частоты изменяется ток в контуре и ток через контур, а также сопротивление контура при параллельном резонансе?
10. Что такое добротность контура? Какие меры следует принять, чтобы получить контур с максимальной добротностью?
11. Как зависит избирательность и полоса пропускания контура от его добротности?
12. Какие измерения можно провести с помощью Q-метра?

6. Литература

1. Винокуров В.И., Каплин С.И., Петелин И.Г. Электрорадиоизмерения: Учеб. пособие для радиотехн. спец. вузов / Под ред. Винокурова В.И. — 2-е изд. — М.: Высш. шк., 1986.
2. Котур В.И. и др. Электрические измерения и электроизмерительные приборы: Учебник для техникумов / Котур В.И. и др. — М.: Энергоатомиздат, 1986.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОВАКУУМНОГО ДИОДА

Цель работы

1. Ознакомиться с важнейшими характеристиками и параметрами электровакуумного диода.
2. Научиться снимать анодные характеристики и определять параметры двухэлектродных ламп.

Содержание работы

1. Снятие анодной характеристики вакуумного диода.
 2. Вычисление параметров вакуумного диода.
1. Краткие теоретические сведения

Электронными лампами называются электронные приборы, работа которых основана на движении свободных электронов в вакууме. В них используется поток свободных электронов, перемещающихся от одного электрода к другому. Электрод, испускающий электроны, называется *катодом*, электрод, принимающий электроны - *анодом*. Для получения свободных электронов используется явление термоэлектронной эмиссии

Термоэлектронная эмиссия – явление испускания (эмиссии) свободных электронов нагретыми телами. Для того, чтобы электрон, находящийся внутри металла, смог покинуть и выйти за пределы поверхности металла, ему нужно сообщить энергию, достаточную для совершения работы выхода. Известно, что энергия электрона, как атома идеального электронного газа, пропорциональна температуре $W = 3/2 \cdot kT$, где k – постоянная Больцмана, а T – температура (в кельвинах). Поэтому, чем выше температура катода, тем больше, эмиттирующих с ее поверхности, свободных электронов.

Вакуум представляет собой сильно разреженный газ (воздух) при давлении от 10^{-5} мм рт. ст. до 10^{-8} мм рт. ст. При этом длина свободного пробега электронов λ должна быть больше расстояния между катодом и анодом. Это необходимо, чтобы электроны, вылетающие из катода, беспрепятственно достигли анода.

Для нагревания катода используется отдельный источник тока, E_n . При этом возможны два варианта катодов: катоды прямого накала и катоды косвенного накала. *Катод прямого накала* представляет собой нить из тугоплавкого металла, например вольфрама, нагреваемую током накала. Для уменьшения работы выхода поверхность нити покрывают тонким слоем металла с низкой работой выхода, например, цезием. Для того чтобы температура катода была неизменной, в цепи накала обязательно нужно использовать источник постоянной э.д.с.

Катоды косвенного накала изолированы от цепи накала. Катоды косвенного накала работают по принципу электрического утюга, который нагревается током, протекающим по спирали, электрически изолированной от корпуса утюга.

Катоды косвенного накала выполняются в виде ни-

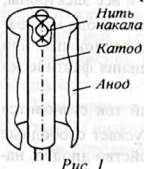


Рис. 1

келевой трубки, на внешней поверхности которой наносится оксидный (эмитирующий) слой, а внутри трубки размещается нить накала (рис. 1), изготовляемая обычно из вольфрамовой проволоки.

Нить накала с помощью тонкого алундового (стекловидного) слоя изолирована от никелевой трубки. При работе электронного прибора электрический ток проходит по нити накала, которая разогревает никелевую трубку.

Анод выполнен в форме цилиндра из тугоплавкого металла. Катод расположен вдоль оси этого цилиндра (см. рис. 1).

Диод – простейшая электронная лампа с двумя электродами: анодом и катодом. Область применения диодов определяется основным их свойством – односторонней проводимостью: выпрямители, детекторы, ограничители, логические схемы и т. д.

Принцип действия диода заключается в следующем. При нагревании катода возникает термоэлектронная эмиссия. При этом из катода вылетают свободные электроны, скорость которых зависит от температуры катода. Если между анодом и катодом отсутствует электрическое поле, то лишь отдельные электроны, обладающие наибольшими энергиями, попадают на анод. Большая же часть электронов возвращается на катод, так как на них оказывают отталкивающее действие ранее вылетевшие электроны. Таким образом, вблизи катода присутствует определенное количество электронов, образующих своеобразное «электронное облако» около катода (рис. 2). Благодаря этому в пространстве между катодом и анодом создается отрицательный объемный заряд. При этом каждый отрезок времени из катода вылетает какое-то количество электронов и столько же возвращается на катод. Вылетающие электроны образуют ток эмиссии. Чем выше температура катода, тем больше ток эмиссии I_s .

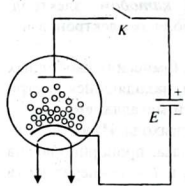


Рис. 2

Если к аноду диода присоединить положительный, а к катоду отрицательный полюс источника э.д.с. E_a , то под действием электрического поля электроны будут двигаться от катода к аноду, создавая анодный ток I_a . При увеличении напряжения между анодом и катодом, называемого анодным напряжением, объемный заряд уменьшается, анодный ток I_a возрастает. При некоторой величине напряжения U_a объемный заряд исчезает и все электроны, эмиттируемые катодом, попадают на анод. Такой режим работы диода называется **режимом насыщения**: он характеризуется максимально возможным при данной температуре катода анодным током диода. Ток насыщения фактически равен току эмиссии катода.

Если к аноду диода присоединить положительный, а к катоду отрицательный полюс источника э.д.с. E_a , то под действием электрического поля электроны будут двигаться от катода к аноду, создавая анодный ток I_a . При увеличении напряжения между анодом и катодом, называемого анодным напряжением, объемный заряд уменьшается, анодный ток I_a возрастает. При некоторой величине напряжения U_a объемный заряд исчезает и все электроны, эмиттируемые катодом, попадают на анод. Такой режим работы диода называется **режимом насыщения**: он характеризуется максимально возможным при данной температуре катода анодным током диода. Ток насыщения фактически равен току эмиссии катода.

При изменении полярности источника э.д.с. E_a анодный ток становится равным нулю. Это связано с тем, что холодный анод не испускает свободные электроны, и обратного тока совершенно нет. Это важное свойство диодов, называемое односторонней проводимостью, широко используется в промышленной электронике.

Основной характеристикой диода является его вольтамперная характеристика – *анодная характеристика*. Анодная характеристика (рис. 3) показывает зависимость анодного тока I_a диода от анодного напряжения U_a при неизменном напряжении накала:

$$I_a = f(U_a) \text{ при } U_{\text{нак}} = \text{const.}$$

Совокупность таких зависимостей между двумя параметрами, каждая из которых отличается от других иным постоянным значением третьего параметра (например, напряжением накала), называется *семейством*, в данном случае, семейством анодных характеристик диода (рис. 4).

Из вольтамперной характеристики диода видно, что даже при отсутствии анодного напряжения ($U_a = 0$) и при малых значениях отрицательного анодного напряжения (участок АВ) через диод протекает небольшой анодный ток. Отрицательное напряжение, при котором анодный ток становится равным нулю, имеет величину порядка $-0,5 \dots -1$ В и называется пороговым напряжением $U_{\text{пор}}$ (точка А).

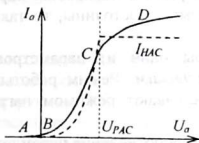


Рис. 3

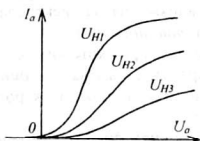


Рис. 4

При положительном анодном напряжении увеличение напряжения приводит к возрастанию анодного тока (участок ВС на рис. 3). Этот участок вольтамперной характеристики соответствует наличию объемного заряда. В этом режиме анодный ток диода меньше тока эмиссии катода, то есть, $I_a < I_e$. Зависимость анодного тока диода от анодного напряжения на участке ВС подчиняется закону «степени трех вторых»:

$$I_a = g U_a^{3/2},$$

где g – коэффициент, зависящий от размеров анода и катода, а также от расстояния между ними. Имеет размерность проводимости – См.

При выводе формулы закона «степени трех вторых» считалось, что электроны из катода вылетают с нулевой скоростью, а катод обладает неограниченной эмиссией. Теоретическая кривая дана на рисунке 3 пунктирной линией. При напряжении $U_{\text{рас}}$ электронное облако исчезает (рассасывается) и дальше анодный ток теоретически не должен расти.

Большинство диодов работает в режиме, соответствующем участку ВС при достаточно низких анодных напряжениях порядка единиц вольт.

При определенной величине анодного напряжения $U_{a, \text{нас}}$ все электроны, эмиттированные катодом при заданной температуре катода T_k , попадают на анод, объемный заряд исчезает, и дальнейшее увеличение анодного напряжения

вызывает незначительное увеличение анодного тока только за счет увеличения скорости электронов (участок CD на рис. 3). Этот участок, характеризующийся максимальным значением тока при данной температуре, соответствует режиму насыщения. В режиме насыщения анодный ток равен току эмиссии ($I_{a,нас} = I_3$).

При изменении тока накала, а, следовательно, и температуры катода величина тока $I_{a,нас}$ изменяется: большему току накала соответствует больший ток насыщения, и наоборот. На рисунке 4 показано семейство анодных характеристик вакуумного диода для различных значений напряжения накала: $U_{н1} > U_{н2} > U_{н3}$.

При работе электронной лампы в ней протекают токи, которые в соответствии с названиями электродов подразделяются на ток анода и ток накала. Совокупность условий работы электронных ламп определяет понятие *режима*. Так, например, электрический режим определяет величины напряжений на электродах и токи в их цепях при работе лампы в определенных условиях.

Каждая из величин, характеризующих режим, называется *параметром режима*. Если напряжения на электродах лампы постоянны, то такой режим работы называют *статическим*.

Режим прибора, при котором хотя бы один из параметров режима изменяется во времени, называется *динамическим*. Режим работы лампы с нагрузкой в цепи какого-либо электрода называют режимом нагрузки или *рабочим режимом*.

Главные параметры диода - внутреннее сопротивление переменному току R_i , крутизна характеристики S и сопротивление постоянному току R_0 .

Крутизна характеристики S показывает, на сколько миллиампер изменится анодный ток диода, если при неизменном напряжении накала изменить анодное напряжение на один вольт. Чтобы определить крутизну характеристики, надо изменение анодного тока разделить на вызвавшее его изменение анодного напряжения ΔU_a :

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_a}, \frac{ма}{в} \quad \text{при } U_n = const.$$

Величина, обратная крутизне характеристики диода, называется *внутренним сопротивлением* переменному току:

$$R_i = \frac{1}{S}, \text{ кОм.}$$

Чтобы определить внутреннее сопротивление переменному току, надо изменение анодного напряжения ΔU_a разделить на вызванное им изменение анодного тока ΔI_a .

Сопротивление постоянному току R_0 позволяет рассматривать диод как обыкновенный резистор: $R_0 = \frac{U_a}{I_a} = \frac{U_a}{g U_a^{3/2}} = \frac{1}{g U_a^{1/2}} \approx \frac{3}{2} R_i$, которое примерно в 1,5 раза больше внутреннего сопротивления лампы.

Вакуумные диоды используются для выпрямления переменного тока и детектирования модулированных сигналов. Диоды, предназначенные для работы с большими токами (в выпрямительных схемах), называются *кеноotronами*. В приложении 1 приведены справочные данные наиболее распространенных вакуумных диодов. В ней приведены основные данные некоторых диодов (кеноотронов), применяющихся в схемах выпрямителей.

Для большинства вакуумных диодов с катодами косвенного накала цепь накала питается переменным током от источника переменного напряжения 6,3 В. Миниатюрные и сверхминиатюрные лампы имеют чаще всего катоды прямого накала и питание цепи накала осуществляется постоянным током напряжением 0,5...1,0 В.

2. Оборудование и приборы

1. Макет с вакуумным диодом.
2. Ампервольтметр АВО-5М - 2 шт.
3. Источник питания ИЭПП-1.
4. Соединительные провода и шнуры.

3. Схема исследования

Схема исследования электровacuумного диода приведена на рис. 5. В данной работе для исследования предлагается маломощный вакуумный диод штыревой конструкции. Роль анода в нем выполняют несколько металлических штырей, расположенных параллельно катоду. В данной лабораторной работе исследуется миниатюрный вакуумный пентод 1Ж29Б в диодном включении.

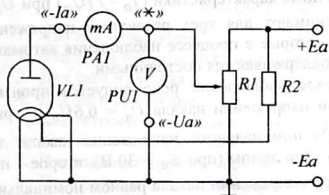


Рис. 5

При этом все три сетки лампы соединены с анодом и образуют двухэлектродную лампу. Хотя лампа имеет катод прямого накала, но в связи с тем, что ток накала составляет всего 60 миллиампер, катод обладает тепловой инерционностью и разогревается долго. При этом температура катода устанавливается (достигает рабочей температуры) только через 1-2 минуты после включения питания.

В схеме исследования анодная и накальная цепи лампы питаются от одного и того же источника постоянного напряжения E_a . Учитывая, что ток накала катода лампы очень мал, и измеряется миллиамперами, питание цепи накала осуществляется от анодного источника через ограничительный резистор R_2 .

Анодное напряжение регулируется потенциометром R_1 и контролируется вольтметром $PU1$. Для измерения анодного тока используется миллиамперметр $PA1$. Для измерения величины анодного тока и анодного и напряжения рекомендуется использовать приборы электромагнитной системы, предназначенные для измерений в цепях постоянного тока. Вольтметр должен иметь шкалу, рас-

считанную на измерение напряжений в пределах 0...30 В, а миллиамперметр выбирается в зависимости от номинальной величины тока анода исследуемого диода. Обычно достаточно использовать миллиамперметр с пределами измерений 0...100 мА.

В качестве измерительных приборов в данной работе используются ампер-вольтметры АВО-5 с измерительными головками магнитоэлектрической системы. Для измерения анодного напряжения выбирается режим «-» (постоянный ток и напряжение), «30 В» (предел измерения) и используются входы «-», « V_{Ξ} , r_X ». Входы прибора в правильной полярности подключаются между гнездами «*» и «- U_a ». Для измерения анодного тока выбирается режим «(-)» (постоянный ток и напряжение), «3 мА» (предел измерения) и используются входы «(-)», «+мА; мкА». Прибор подключается между гнездами «*» и «- I_a ».

Питание подается на гнезда «+ E_a » и «- E_a » от диодного выпрямителя с выходным напряжением 10...50 В.

Так как нить накала катода питается от анодного источника, то ток и напряжение накала зависят от питающего напряжения E_a . Например, при $E_a = 40$ В напряжение накала составляет $U_n = 1,0$ В, при напряжениях $E_a = 50$ В и $E_a = 30$ В напряжение накала составляет соответственно $U_n = 1,2$ В и $U_n = 0,8$ В.

4. Снятие анодных характеристик диода

Таблица 1

Анод-ное на-пряж. $U_a, В$	Анодный ток $I_a, мА$...		
	$U_{H1} = 0,8 В$	$U_{H2} = 1,0 В$	$U_{H3} = 1,2 В$

Перед снятием анодных характеристик диода заготавливают таблицу наблюдений (табл. 1).

Анодные характеристики ($I_a = f(U_a)$ при $U_n = const$) снимают для трех различных напряжений накала, которые в процессе наблюдения автоматически поддерживаются постоянными.

Первое наблюдение рекомендуется производить при напряжении накала $U_n = 0,6 U_{nном}$, равном 60% номинального напряжения накала для данного типа лампы (при $E_a = 30$ В), второе – при $0,8 U_{nном}$, (при $E_a = 40$ В) и третье – при напряжении накала равном номинальному напряжению накала (при $E_a = 50$ В). Нужное напряжение накала обеспечивается установкой соответствующего напряжения питания. В процессе измерений анодное напряжение изменять с помощью потенциометра $R1$ от 0 до 40 В через каждые 5 В.

Следует помнить, что, снимая анодные характеристики, необходимо начинать измерения анодного тока через 1-2 минуты после установления требуемого напряжения накала, чтобы на катоде установилась постоянная температура.

5. Построение характеристик и определение параметров диода

На основании результатов наблюдений, записанных в таблице 1, в прямоугольной системе координат строят графики трех анодных характеристик исследуемого диода. Примерный вид этих характеристик показан на рисунке 4.

На графике $I_a = f(U_a)$ для номинального напряжения накала определяют значение крутизны анодной характеристики S и внутреннее сопротивление переменному току R_i . Для этого отмечают две точки на участке наибольшего наклона характеристики и определяют приращения ΔU_a и ΔI_a , а затем по формулам

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_a} \text{ и } R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} \text{ вычисляют их.}$$

5. Указания к отчету

Отчет должен содержать:

1. Наименование и цель работы.
2. Таблицу основных (паспортных) данных исследуемых диодов.
3. Схему для снятия характеристик диода с краткой характеристикой входящих в нее элементов.
4. Таблицы наблюдений.
5. Семейство анодных характеристик.
6. Расчет параметров диода S , R_i .
7. Краткие выводы о работе.
8. Ответы на контрольные вопросы.

6. Контрольные вопросы

1. Что такое «вакуум»?
2. Что такое «термоэлектронная эмиссия»?
3. Для чего нужен катод?
4. Для чего нужен анод?
5. Как устроен катод косвенного накала?
6. Что такое «ток эмиссии»?
7. Что означает «режим насыщения»?
8. Что представляет собой анодная характеристика диода?
9. Что такое «семейство анодных характеристик» диода?
10. Крутизна характеристики диода.
11. Внутреннее сопротивление диода.
12. Как вычислить параметры диода по его анодной характеристике?

7. Литература

1. Гершензон Е. М. и др. Радиотехника. Учебное пособие для педвузов. - М.: Просвещение, 1986.
2. Манаев Е. И. Основы радиоэлектроники. - М.: Радио и связь, 1985.
3. Молчанов А. П., Занадворов П. Н. Курс электротехники и радиоэлектроники. - М.: Наука, 1978.

Лабораторная работа 5

СНЯТИЕ И АНАЛИЗ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВАКУУМНОГО ТРИОДА

Цель работы:

1. Ознакомиться с физическими основами работы вакуумного триода.
2. Научиться вычислять параметры электронных ламп по их вольтамперным характеристикам.

Содержание работы:

1. Исследование работы вакуумного триода в статическом и динамическом режимах.

1. Краткие теоретические сведения

Электровacuумная лампа – *триод* – состоит из трех электродов: анода, катода и управляющей сетки. **Назначение катода** – в процессе термоэлектронной эмиссии испускать свободные электроны, для этого катод нагревают от специального источника питания накала. **Назначение анода** – притягивать электроны, вылетающие из катода. Для этого на анод подают положительное напряжение от высоковольтного анодного источника (U_a).

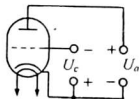


Рис. 1

Электроны, вылетающие из катода, летят в сторону положительного анода и создают анодный ток. Хотя электроны движутся от катода к аноду, **анодный ток течет от анода к катоду**. **Назначение управляющей сетки** – управлять величиной анодного тока. В процессе работы на управляющую сетку подается управляющее напряжение (U_c).

На электроны, вылетевшие из катода, влияют одновременно два электрических поля: поле *анод-катод* и поле управляющей сетки (поле *сетка-катод*). Поэтому величина анодного тока I_a зависит одновременно от анодного и сеточного напряжений, то есть, $I_a = f(U_a, U_c)$.

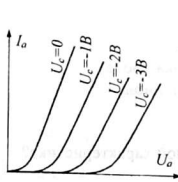


Рис. 2

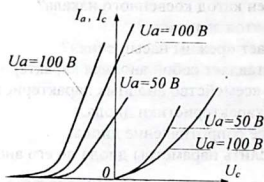


Рис. 3

Ввиду невозможности выразить эту зависимость какой-либо аналитической формулой, пользуются ее графическим представлением в виде *анодной*, *анодно-сеточной* и *сеточной* характеристик. Для этого одно из переменных U_a или U_c считают фиксированным и строят зависимость анодного тока I_a только

от одного напряжения (от U_a или от U_c). Такой режим лампы с фиксированным (постоянным) значением напряжения анода или сетки называется *статическим*.

Зависимость анодного тока от анодного напряжения при неизменном напряжении на управляющей сетке ($U_c = const$) называется *анодной характеристикой*. Несколько анодных характеристик одной лампы, построенных для фиксированных значений напряжения на управляющей сетке, составляют семейство анодных характеристик (рис. 2). Пользуясь ими можно, путем интерполяции, определить величину анодного тока I_a для любых значений U_a и U_c .

Главной характеристикой триода является зависимость анодного тока от напряжения на управляющей сетке, называемая анодно-сеточной характеристикой, то есть, зависимость $I_a = f(U_c)$. Эта зависимость снимается при постоянном анодном напряжении и называется *статической анодно-сеточной характеристикой*. Несколько анодно-сеточных характеристик лампы, снятых при фиксированных значениях анодного напряжения, составляют *семейство анодно-сеточных характеристик* (рис. 3, левая часть). Указанные семейства позволяют однозначно определить значения анодного тока лампы I_a при любых значениях напряжений U_a и U_c (с определенной точностью).

Хотя на сетку триода обычно подается отрицательное напряжение, однако на практике возникают моменты, когда напряжение на сетке может оказаться положительным и тогда возникает сеточный ток (промежуток сетка-катод аналогичен диоду). Зависимость сеточного тока от приложенного между сеткой и катодом напряжения называется сеточной характеристикой. Несколько сеточных характеристик, снятых при фиксированных значениях анодного напряжения составляют семейство сеточных характеристик. Семейство сеточных характеристик обычно изображают совместно с семейством анодно-сеточных характеристик (на рис. 3 они расположены в правой части рисунка). Обратите внимание, что при отрицательном напряжении на сетке сеточный ток отсутствует ($I_c = 0$).

Основными параметрами триода являются крутизна характеристики S , внутреннее сопротивление R_i и коэффициент усиления μ .

Крутизна характеристики выражает скорость нарастания анодного тока с ростом сеточного напряжения и равна тангенсу угла наклона анодно-сеточной характеристики.

$$S = \Delta I_a / \Delta U_c \text{ при } U_a = const.$$

Внутренним сопротивлением лампы называется ее сопротивление переменному току $R_i = \Delta U_a / \Delta I_a$ при $U_c = const$.

Коэффициент усиления лампы показывает, во сколько раз изменение сеточного напряжения влияет на анодный ток сильнее, чем такое же изменение анодного напряжения $\mu = \Delta U_a / \Delta U_c$ при $I_a = const$. Дело в том, что изменения анодного тока на один миллиампер можно добиться, либо увеличив анодное

напряжение на U_a (десятки вольт), либо изменив сеточное напряжение на ΔU_c (несколько милливольт).

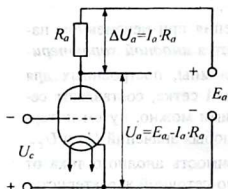


Рис. 4

ное напряжение сигнала, подаваемого на управляющую сетку лампы (рис. 4).

Анодный ток, протекая через нагрузку R_a , создает на ней падение напряжения

$U_a = I_a \cdot R_a$, поэтому напряжение на аноде лампы оказывается меньше

напряжения анодного источника, то есть, $U_a = E_a - I_a \cdot R_a$ (2).

Обратите внимание: чем больше анодный ток лампы, тем меньше анодное напряжение, это означает, что изменения анодного тока и анодного напряжения противофазны. То же самое можно сказать и относительно противофазности сеточного и анодного напряжений: если напряжение на сетке возрастает, напряжение на аноде уменьшается и наоборот, если напряжение на сетке уменьшается, напряжение на аноде возрастает. Это «золотое правило лампы», вы должны его помнить всегда!

Так как при изменениях сеточного напряжения анодное напряжение не может оставаться постоянным (см. уравнение 2), то такой режим, когда одновременно изменяются все три величины U_c , I_a и U_a , называется *динамическим режимом*.

Применение статических характеристик в динамическом режиме оказывается невозможным. Обычно для ламп строят семейство динамических анодно-сеточных характеристик при конкретных значениях анодной нагрузки R_a и номинальном значении э.д.с. источника $E_a = E_{aном}$ (рис. 5).

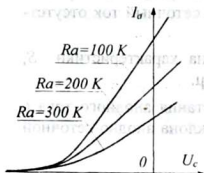


Рис. 5

Динамическую анодно-сеточную характеристику можно построить для любого выбранного сопротивления нагрузки по семейству статических анодных характеристик, снятых при различных сеточных напряжениях. Для этого необходимо графически решить систему из двух уравнений:

$$\begin{cases} I_a = f(U_a) \\ U_a = E_a - I_a \cdot R_a \end{cases}$$

Первое уравнение представляет собой семейство анодных характеристик, а второе - уравнение прямой, называемой *нагрузочной прямой*. Нагрузочная прямая AB строится непосредственно на изображении семейства анодных характеристик по двум точкам, определяемым заданными значениями R_a и E_a (см. рис. 6, а). Первая точка (точка A) называется точкой короткого замыкания, когда сопротивление лампы равно нулю и через лампу протекает максимальный анодный ток $I_a = I_{max} = E_a / R_a$. Вторая точка (точка B) соответствует режиму полностью запертой лампы и анодный ток равен нулю. При этом напряжение на аноде равно величине э.д.с. источника питания $U_a = E_a$.

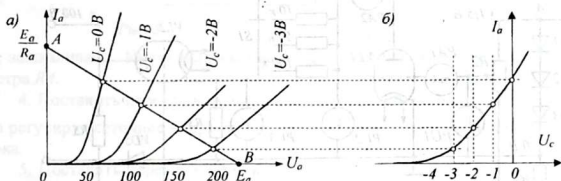


Рис. 6

Точки пересечения нагрузочной прямой с анодными характеристиками являются решениями системы уравнений, то есть, в любой момент времени значения величин U_c , I_a и U_a соответствуют точке, принадлежащей нагрузочной прямой. Поэтому, если записать значения величин U_c , I_a для нескольких точек нагрузочной прямой, то на их основании можно построить динамическую анодно-сеточную характеристику лампы при заданных значениях нагрузки R_a и э.д.с. источника E_a (рис. 6, б).

2. Схема исследования

Для снятия статических и динамических характеристик триода используется установка, выполненная в виде панели с пятью приборами для измерения токов и напряжений U_c , U_a , E_a , I_a , I_c (рис. 7).

Установка позволяет провести полное исследование вакуумного триода, не меняя электрических соединений. С помощью потенциометров $R2$ и $R4$ можно регулировать сеточное и анодное напряжения.

Для того, чтобы иметь возможность подавать на сетку и положительное и отрицательное напряжения, в установке применен делитель напряжения, состоящий из трех последовательно включенных кремниевых диодов $VD1...VD3$ и резистора $R1$. Так как ток через диод протекает только в том случае, если приложенное напряжение превышает потенциальный барьер $p-n$ -перехода (для кремниевых диодов он составляет около 0,5 В), то протекающий ток, независимо от его величины, создает на трех диодах падение напряжения порядка 1,5 В.

Поэтому точки А и В имеют относительно катода исследуемой лампы потенциалы $+1,5 \text{ В}$ и $-10,5 \text{ В}$ соответственно.

С помощью потенциометра $R2$, подключенного между точками А и В, напряжение на сетке можно установить положительным или отрицательным. Вольтметр $PU1$ позволяет контролировать сеточное (относительно катода) напряжение, а миллиамперметр $PA1$ - сеточный ток, возникающий при положительном напряжении на сетке. Соответственно анодное напряжение и анодный ток контролируются приборами $PU2$ и $PA2$.

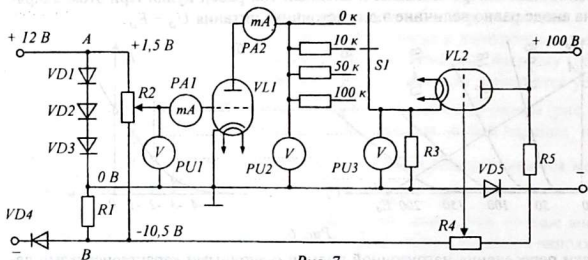


Рис. 7

С помощью переключателя $S1$ можно изменять величину анодной нагрузки лампы, что необходимо для снятия статических и динамических характеристик лампы. Например, если установить анодную нагрузку $R_a = 0$, то потенциал анода будет равен напряжению источника, то есть $U_a = E_a = const$ и при этом можно снимать статические анодные и анодно-сеточные характеристики.

Вместо крупногабаритного дорогостоящего потенциометра для установки нужного напряжения питания E_a использован триод $VL2$, сопротивление (проводимость) которого можно изменять. Устанавливая с помощью делителя напряжения $R5R4$ сеточное напряжение лампы от $+100 \text{ В}$ до $-10,5 \text{ В}$, можно управлять ее анодным током и даже запереть.

Диоды $VD4$ и $VD5$ установлены для защиты схемы и измерительных приборов от случайной подачи напряжения в обратной полярности и устраняют гальваническую связь между источниками питания.

3. Оборудования и приборы

1. Установка с приборами для снятия статических и динамических характеристик вакуумного триода.
2. Источник питания УИП-2.
3. Источник питания ИЭПП-1.
4. Испытываемая лампа (по указанию преподавателя).
5. Соединительные провода и шнуры.

4. Сборка и опробование схемы

1. Ознакомиться со схемой и изучить особенности регулировок напряжений E_a и U_c .

2. Произвести электрические соединения согласно рисунку 8 (не забудьте установить все регуляторы напряжения на минимум!).



Рис. 8

3. После проверки преподавателем включить схему, плавно повышая напряжение, установить выходное напряжение источника УИП-2 равным 100 вольт. Убедиться, что приборы

не зашкаливают. Иначе напряжение следует уменьшить с помощью потенциометра R_4 .

4. Поставить переключатель $S1$ в положение «0» (то есть, $R_a = 0$) и плавно регулируя сеточное напряжение, убедиться в наличии и изменении анодного тока.

5. Поставить переключатель в положение «10 кОм». Убедиться, что анодное напряжение U_a меньше, чем E_a .

6. Возвратить переключатель $S1$ в положение «0». На сетке установить отрицательное максимальное напряжение (-10 В). При этом анодный ток должен быть равен нулю.

7. Уменьшить потенциометром R_4 до нуля анодное напряжение. Выключить схему.

5. Эксперименты и измерения

1. Выписать справочные данные испытываемого триода: $U_{aном}$, $U_{cном}$, $I_{aном}$, S , R_i , μ (см. приложения). Зарисовать цоколевку лампы.

2. Снять анодную характеристику триода при нормальном напряжении на управляющей сетке. Для этого включить установку и после прогрева в течение 1-2 минут потенциометром R_2 установить номинальное сеточное напряжение (согласно справочным данным). Повышая потенциометром R_4 анодное напряжение от нуля до номинального значения, записывать значения анодного напряжения и соответствующие значения анодного тока в таблицу 1. Измерения провести не менее, чем для десяти значений анодного напряжения. В ходе измерений следить, чтобы показания сеточного вольтметра не менялись и в случае необходимости, корректировать его потенциометром R_2 .

Таблица 1

$U_c = U_{cном} =$							
U_a, B							
I_a, mA							

3. Установить анодное напряжение $U_a = 0$ В и сеточное напряжение $U_c = 0$ В. Снять анодную характеристику лампы при $U_c = 0$ В (см. п. 2). Результаты измерений записать в табл. 2.

Таблица 2

$U_c = 0$ В										
$U_a, В$										
I_a, mA										

4. Установить анодное напряжение $U_a = 0$ В и аналогичным образом снять анодную характеристику лампы при сеточных напряжениях $U_c = 0,5 U_{cном}$ и $U_c = 2 U_{cном}$. Результаты занести в таблицы 3, 4.

Таблица 3

$U_c = 0,5 U_{cном} =$										
$U_a, В$										
I_a, mA										

Таблица 4

$U_c = 2 U_{cном} =$										
$U_a, В$										
I_a, mA										

5. Снять анодно-сеточную характеристику триода при номинальном напряжении на аноде. Для этого установить на управляющей сетке максимальное отрицательное напряжение, а на аноде - номинальное напряжение $U_{aном}$ (по справочнику).

Уменьшать отрицательное напряжение на сетке, поддерживая анодное напряжение неизменным. В таблицу 5 записать значения сеточного напряжения и соответствующие им значения анодного и сеточного токов. Сеточное напряжение изменять до $+1 \dots +1,5$ В.

Таблица 5

$U_a = U_{aном} =$										
$U_c, В$										
I_a, mA										
I_c, mA										

6. Установить анодное напряжение на 20% ниже номинального и снять анодно-сеточную характеристику при пониженном анодном напряжении. Результаты измерений записать в таблицу 6.

Таблица 6

$U_a = 0,8 U_{aном} =$										
$U_c, В$										
I_a, mA										
I_c, mA										

7. Чтобы определить параметры лампы методом трех отсчетов, сделать три измерения. Для этого необходимо:

а) установить номинальные напряжения на сетке и на аноде лампы. Измерить анодный ток и записать показания приборов в первую строку таблицы 7:

б) Изменить сеточное напряжение не более чем на один вольт (лучше, в сторону увеличения), поддерживая анодное напряжение неизменным. Записать показания приборов во вторую строку таблицы 7:

Таблица 7

Отсчеты	U_c	U_a	I_a
1.			
2			
3			

в) сохраняя установленное сеточное напряжение, изменить анодное напряжение таким образом, чтобы получился такой же анодный ток, как в первом отсчете. Показания приборов записать в третью строку таблицы 7.

Обратите внимание: каждые две строки таблицы должны иметь по одной совпадающей U_c , U_a или I_a .

По данным таблицы определить приращения ΔU_c , ΔU_a , ΔI_a и по соответствующим формулам вычислить параметры лампы S , μ , R_f .

8. Снять динамическую анодно-сеточную характеристику лампы при $E_a = U_{aном}$ и анодной нагрузке $R_a = 10$ кОм. Для этого переключатель $S1$ перевести в положение «10 кОм». Изменяя сеточное напряжение, записывать в таблицу 8 значения U_c , I_a , U_a .

Таблица 8

	$E_a = U_{aном} =$					$R_a =$				
U_c, B										
I_a, mA										
U_a, B										

9. Аналогичные измерения произвести для двух других значений сопротивления анодной нагрузки: 50 кОм и 100 кОм. Результаты занести в таблицы 9 и 10, сделанные по аналогии с таблицей 8.

10. На этом измерения закончить. Выключить установку.

6. Обработка результатов измерений

1. На основании таблиц 1-4 построить семейство статических анодных характеристик триода (аналогично рисунку 2).

2. На основании таблиц 5-6 построить семейство статических анодно-сеточных характеристик (по аналогии с рис. 3). Сделать выводы.

3. Вычислить параметры триода методом трех отсчетов (табл. 7) и сверить со справочными данными.

4. На основании таблиц 8-10 построить динамические анодно-сеточные характеристики триода (аналогично рис. 5). Обратите внимание на уменьшение крутизны характеристики с увеличением величины сопротивления анодной нагрузки.

5. Построить нагрузочные прямые на семействе статических анодных характеристик для трех значений сопротивления нагрузки. Проверить соответствие электрических величин U_c , U_a , I_a на нагрузочной прямой значениям соответствующих величин на семействе динамических характеристик триода. Сделать выводы.

7. Указания к отчету

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Наименование и цель работы.
2. Справочные данные исследуемого триода, его цоколевку.
3. Схему исследования.
4. Таблицы измерений.
5. Статистические и динамические характеристики триода.
6. Результаты вычислений. Выводы.
7. Ответы на контрольные вопросы.

8. Вопросы для подготовки

1. Каково назначение сетки триода?
2. Какие зависимости называются анодными, анодно-сеточными, сеточными характеристиками лампы?
3. Основные параметры триода, их определения.
4. Внутреннее уравнение лампы.
5. Чем отличаются статический и динамический режимы работы триода?
6. Как изменяются анодный ток и анодное напряжение при динамическом режиме работы триода?
7. Можно ли построить динамическую анодно-сеточную характеристику лампы на основании семейства статических анодных характеристик?
8. Что представляет собой нагрузочная прямая и как она строится?
9. Почему с увеличением сопротивления нагрузки уменьшается крутизна анодно-сеточной характеристики лампы?

9. Литература

1. Гершензон Е. М. и др. Радиотехника. Учебное пособие для педвузов. - М.: Просвещение, 1986.
2. Манаев Е. И. Основы радиоэлектроники. - М.: Радио и связь, 1985.
3. Молчанов А. П., Занадворов П. Н. Курс электротехники и радиоэлектроники. - М.: Наука.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ

Цель

работы:

1. Изучить устройство и принцип работы полупроводникового диода.
2. Научиться измерять параметры и строить вольтамперные характеристики полупроводниковых диодов.

Содержание
работы:

1. Исследование точечных и плоскостных полупроводниковых диодов.
2. Исследование режимов работы стабилитрона.

1. Краткие теоретические сведения

В зависимости от вида примесей полупроводники приобретают преимущественно дырочную или преимущественно электронную проводимость. В полупроводниках *p*-типа число подвижных дырок (основных носителей заряда) во много раз больше числа подвижных электронов (неосновных носителей заряда), при этом имеется большое количество неподвижных отрицательных зарядов. В полупроводниках *n*-типа – все наоборот: основными носителями зарядов являются электроны, неосновными – дырки, имеется большое число неподвижных дырок.

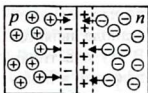


Рис. 1

При соприкосновении двух полупроводников противоположного типа проводимости подвижные дырки из полупроводника *p*-типа и подвижные электроны из полупроводника *n*-типа начинают взаимно притягиваться и рекомбинировать. Но рекомбинации протекают не «до последнего электрона или дырки», а вскоре прекращаются, потому что вблизи границы раздела двух полупроводников образуется тонкая область, в которой нет свободных носителей заряда, но остаются неподвижные электроны в полупроводнике *p*-типа и неподвижные дырки в полупроводнике *n*-типа (рис. 1).

Образуется двойной электрический слой из неподвижных (связанных) электронов и дырок. Эти два слоя создают потенциальный барьер ($\Delta\varphi = 0,3 \dots 0,5$ В), препятствующий рекомбинации оставшихся подвижных носителей заряда. Эта область называется *p-n*-переходом. Толщина *p-n*-перехода составляет 30-40 мкм. Основное свойство *p-n*-перехода - односторонняя проводимость.

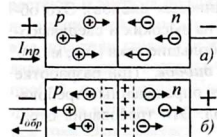


Рис. 2

При подаче прямого напряжения (рис. 2, а) *p-n*-переход сужается, дырки из области *p* и электроны из области *n* движутся навстречу и, достигая границы, рекомбинируют, обеспечивая протекание через диод прямого тока I_{np} . Обратите внимание, что в *p*-области ток обеспечивается движением дырок, а в *n*-области – движением электронов.

При подаче обратного напряжения электроны и дырки взаимно удаляются от границы раздела, p - n -переход расширяется (рис. 2, б). Однако незначительный обратный ток $I_{обр}$ все же имеется, и он обусловлен движением неосновных носителей заряда, наличие и концентрация которых зависит от химической чистоты материалов, взятых для изготовления диода. Полупроводниковые приборы с одним p - n -переходом называются диодами. Условное обозначение полупроводникового диода приведено на рисунке 3, а. Анодом является область p , а катодом - область n .

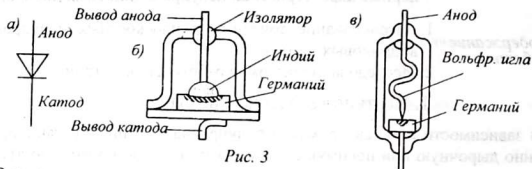


Рис. 3

В зависимости от назначения, принципов работы и конструктивных особенностей диоды разделяются на выпрямительные, туннельные, сверхвысоко-частотные, стабилитроны, варикапы, фотодиоды, светодиоды и т.п. приборы. Диоды изготовляют из германия, кремния и других полупроводниковых материалов, и в зависимости от конструкции их разделяют на плоскостные и точечные диоды.

1.1. **Конструкция полупроводникового диода.** Устройство плоскостного диода показано на рисунке 3, б. Основной частью плоскостного диода является пластинка германия (или кремния) с проводимостью типа n . В эту пластинку вплавлен кусочек индия (или алюминия), создающий за счет диффузии в полупроводнике n -типа область с избытком дырок, то есть, область с проводимостью p -типа. Вывод анода припаивается к индию, а катода - к пластинке полупроводника, которая для лучшего теплоотвода крепится непосредственно к дну корпуса диода. Значительная площадь p - n -перехода позволяет пропускать через плоскостной диод большие токи (А, мА).

Точечный диод (рис. 3, в) состоит также из пластинки полупроводника n -типа, на которую упирается тонкая вольфрамовая игла. В процессе изготовления диода через него пропускают неразрушающий импульс тока, под действием которого происходит «микросварка» и в ограниченном пространстве под острием иглы образуется крошечная область p -проводимости. Малая площадь p - n -перехода обуславливает незначительную величину междуэлектродной емкости (1-2 пФ для германиевых и порядка 0,5 пФ для кремниевых диодов). Это обстоятельство позволяет использовать точечные диоды на высоких и сверхвысоких частотах. Через точечный диод нельзя пропускать большие токи (мА, мкА).

1.2. **Основные параметры полупроводниковых диодов.** При разработке схем электронных устройств к диодам предъявляются определенные требования, которым должен удовлетворять конкретный диод. Эти требования отражаются в основных параметрах диода, это:

- максимально допустимый выпрямленный ток $I_{\text{макс}}$;
- прямое падение напряжения на диоде $U_{\text{пр}}$ при $I_{\text{ном}}$;
- максимально допустимое обратное напряжение $U_{\text{обр,макс}}$;
- максимальный обратный ток $I_{\text{обр,макс}}$ при $U_{\text{обр,макс}}$;
- предельная частота $f_{\text{макс}}$.

1.3. Вольтамперные характеристики диода.

Основной характеристикой полупроводникового диода является его вольт-амперная характеристика, показывающая зависимость тока через диод от полярности и величины приложенного напряжения. Вольтамперная характеристика снимается при прямом (пропускном) и обратном включении диода и обе ветви характеристики изображают вместе (рис. 4).

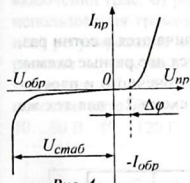


Рис. 4

Для сравнения вентиляльных (выпрямительных) свойств диодов иногда рассматривают их прямое и обратное сопротивления: $R_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{пр}}}{I_{\text{пр}}}$; $R_{\text{обр}} = \frac{U_{\text{обр}}}{I_{\text{обр}}}$.

Первое измеряется в омах, а второе – в мегаомах.

Если к диоду приложить прямое (открывающее) напряжение, ток через диод начинает протекать только тогда, когда приложенное напряжение превысит потенциальный барьер ($U > \Delta\phi$). Под действием прямого напряжения подвижные дырки в области p и подвижные электроны в области n приближаются к p - n -переходу, p - n -переход сужается и исчезает при $U = \Delta\phi$. При дальнейшем повышении прямого напряжения ток диода растет быстро. Это – прямая ветвь вольтамперной характеристики диода.

Если к диоду приложить напряжение обратной полярности, то собственное поле p - n -перехода и внешнее поле складываются, при этом p - n -переход расширяется, так как основные носители зарядов взаимно удаляются от p - n -перехода. Электрическое поле p - n -перехода при такой полярности напряжения является тормозящим для основных носителей заряда и ускоряющим – для неосновных носителей заряда. Это означает, что закрытый для основных носителей p - n -переход «прозрачен» для неосновных носителей заряда.

Вначале, с повышением обратного напряжения, обратный ток практически не возрастает, но, начиная с некоторого значения обратного напряжения, скорость неосновных носителей, а вместе с ней и их кинетическая энергия, возрастают, и энергия неосновных носителей становится достаточной для ударной ионизации нейтральных атомов полупроводника. В результате появляются новые носители зарядов, которые, в свою очередь, ускоряются полем и вызывают лавинообразное возрастание числа подвижных носителей зарядов. Происходит пробой p - n -перехода. При этом обратный ток резко возрастает и ветвь обратного тока вольтамперной характеристики диода идет практически параллельно оси тока. Это означает, что в режиме пробоя напряжение на диоде практически не зависит от величины протекающего обратного тока, то есть, $U = \text{const}$. Это

позволяет использовать полупроводниковые диоды в качестве стабилизаторов напряжения – *стабилитронов*.

Стабилитроны изготавливаются из кремния и могут стабилизировать напряжения в пределах единиц – сотен вольт. Стабилизация напряжений ниже 1 В достигается путем использования кремниевых диодов, включаемых в прямой полярности. Такие диоды называются *стабисторами*. Например, обычный кремниевый диод при прямом включении и номинальном токе обеспечивает стабильное напряжение порядка 0,7 В.

2. Схемы исследования

Поскольку прямое и обратное напряжения диода отличаются в сотни раз, для исследования полупроводниковых диодов используются две разные схемы: одна – схема 1 – для снятия вольтамперных характеристик точечного и плоскостного диодов при прямом включении (рис. 5), другая – схема 2 – для тех же диодов, но при обратном включении (рис. 6).

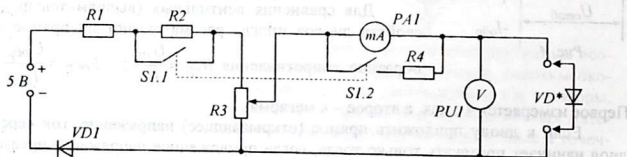


Рис. 5

Первая схема имеет низковольтное питание (0...5 В), так как прямое (пропускное) напряжение диода не превышает 0,5–1,5 В. При прямом включении даже при малом напряжении через диод может протекать значительный ток. А чтобы этот ток не оказался недопустимо большим, потенциометр R_3 включен последовательно с ограничительными резисторами R_1 , R_2 . Напряжение, подаваемое на вход схемы, распределяется между сопротивлениями R_1 , R_2 и потенциометром R_3 . Это ограничивает величину приложенного к диоду напряжения и, тем самым, ограничивает величину протекающего через диод тока в пределах допустимого.

Поскольку прямой ток плоскостного диода намного больше прямого тока точечного диода, изменение пределов измерения миллиамперметра $PA1$ достигается включением шунта R_4 с небольшим сопротивлением. При этом ток через миллиамперметр уменьшается, а пределы измерений расширяются.

Сдвоенный переключатель $SI.1-SI.2$ одновременно с выключением шунта увеличивает балластное сопротивление на величину R_2 , что защищает миллиамперметр от случайного зашкаливания. Сдвоенный переключатель представляет собой два переключателя, механически связанные так, что переключение одного происходит одновременно с переключением другого. На схеме эта связь показана пунктирной линией, которая на схеме не обязательна, так как на их связанность показывает общая часть их обозначения – « $SI.$ ».

Таким образом, при измерении прямого тока точечного диода выключатели $SI.1$, $SI.2$ должны быть отключены, а при работе с плоскостным диодом - включены.

Диод $VD1$ включен в схему для защиты ее на случай ошибочной подачи высокого напряжения в обратной полярности. Схема работает только при правильном включении питания.

Схема для снятия вольтамперных характеристик диодов при обратном включении (рис. 6) рассчитана на высокое напряжение и, чтобы отказаться от использования громоздких реостатов, в ней применено ступенчатое (дискретное) регулирование напряжения. В пределах каждой ступени плавное регулирование осуществляется потенциометром $R10$. С помощью двоянного переключателя $S2.1$ - $S2.2$ можно получить напряжения 40, 80, 120, 160, 200 В, а потенциометр $R10$ позволяет регулировать напряжение в пределах 0...40 В, 40...80 В, 80...120 В, 120...160 В, 160...200 В.

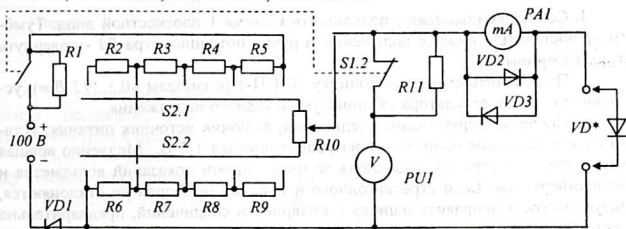


Рис. 6

Поскольку допустимые обратные напряжения точечного и плоскостного диода неодинаковы, то при использовании одного вольтметра изменение цены его шкалы осуществляется подключением добавочного сопротивления. Двоянный переключатель $SI.1$ - $SI.2$ одновременно с замыканием добавочного сопротивления $R11$ и переводом вольтметра $PU1$ на большую чувствительность, снижает подаваемое на схему напряжение подключением в цепь делителя дополнительного гасящего резистора $R1$.

Диоды $VD2$, $VD3$ служат для защиты ценного прибора - микроамперметра $pA1$ от чрезмерного тока. В любом случае, напряжение, приложенное к микроамперметру не может превысить величины 0,5 В, что соответствует прямому напряжению на полностью открытом диоде.

Диод $VD1$ имеет то же назначение что и в предыдущей схеме, то есть, он защищает схему от случайного включения источника питания в обратной полярности.

3. Оборудование и приборы

1. Установка для снятия вольтамперной характеристики диодов при прямом включении.

2. Установка для снятия вольтамперной характеристики диодов при обратном включении.
3. Источник питания ИЭПП-1.
4. Источник питания УИП-2.
5. Исследуемые диоды (по указанию преподавателя).
6. Соединительные проводники.

4. Сборка и опробование схемы

1. Ознакомиться с оборудованием и особенностями схем исследования. Зарисовать обе схемы исследования.

2. Ознакомиться с диодами, предложенными для исследования. Зарисовать их внешний вид и указать выводы анода и катода.

3. По справочнику определить и записать основные параметры диодов: $I_{пр. макс}$, $U_{обр. макс}$, $I_{пр. ном}$, $U_{пр. ном}$.

4. Соблюдая цоколевку, подключить к схеме 1 плоскостной диод. Тумблер $S1$ поставить в нижнее положение, а ручку потенциометра $R3$ - повернуть влево (на минимум).

5. Подключить схему к источнику ИЭПП-1 (к гнездам «0,5...12 В»), установив ручку его регулятора на минимум выходного напряжения.

6. После проверки схемы соединений, включив источник питания, установить его выходное напряжение на уровне порядка 1-2 В. Медленно вращая ручку потенциометра $R3$, наблюдать за изменениями показаний вольтметра и миллиамперметра. Если стрелки одного или обоих приборов не отклоняются, следует найти и исправить ошибку в полярности соединений, предварительно обесточив схему.

7. Аналогичную работу провести со схемой 2. Для этого установить на нее тот же плоскостной диод, опять же учитывая полярность включения. Тумблер $S1$ поставить в нижнее, а ручки переключателя $S2$ и потенциометра $R10$ - в крайнее левое положение.

8. Подключить схему к источнику постоянного напряжения на 100-200 В.

9. После проверки, включить источник питания в сеть, подать на схему напряжение порядка 50-70 В. Манипулируя переключателем $S2$ и потенциометром $R10$, по меняющимся показаниям вольтметра и микроамперметра убедиться в работоспособности схемы. Если стрелки одного или двух приборов не отклоняются, - отключить схему и устранить ошибку в соединениях.

10. Переставьте плоскостной диод на схему 1.

5. Эксперименты и измерения

5.1. Вольтамперные характеристики диодов при прямом включении.

1. Включить питание схемы 1 и, плавно увеличивая напряжение, через каждые 0,05 В записывать в таблицу 1 значения прямого тока плоскостного диода. При измерениях следить, чтобы ток не превысил максимально допустимого выпрямленного тока для данного диода.

Таблица 1

Тип диода		(прямой ток)							
$U_{пр}, В$	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4
$I_{пр}, мА$									

2. Выключить схему и установить на нее точечный диод. Тумблер $S1$ перевести в верхнее положение «1», а ручку потенциометра $R3$ – в левое положение, соответствующее минимуму напряжения.

3. Включить питание. Плавно повышая напряжение, через каждые 0,05 В записывать в таблицу 2 значения напряжения и тока. При этом будьте внимательны: точечный диод не рассчитан на значительные токи, и поэтому нельзя доводить прямой ток до максимально допустимого значения.

Таблица 2

Тип диода		(прямой ток)							
$U_{пр}, В$	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4
$I_{пр}, мА$									

4. По окончании измерений вернуть потенциометр $R3$ в левое – минимальное - положение. Выключить питание. Вместо точечного диода подключить стабилитрон в прямой полярности.

5. Повторяя действия, указанные в п.3, снять вольтамперную характеристику стабилитрона при прямом включении. Данные записать в таблицу 3.

6. Выключить схему и, не разбирая установку, перейти к схеме 2.

Таблица 3

Тип стабилитрона		(прямой ток)							
$U_{пр}, В$	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4
$I_{пр}, мА$									

5.2. Вольтамперные характеристики диодов при обратном включении

1. Присоединить, соблюдая полярность, исследуемый плоскостной диод к схеме 2. Тумблер $S1$ должен находиться в нижнем положении, а ручки переключателя $S2$ и потенциометра $R10$ – в левом положении.

2. Включить источник питания, установить на его выходе напряжение порядка 100 В. Плавно повышая напряжение на диоде потенциометром $R10$, записывать в таблицу 4 значения напряжения и соответствующего обратного тока. Измерения производить через каждые 5-10 В.

Таблица 4

Тип диода		(обратный ток)									
$U_{обр}, В$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$I_{обр}, мкА$											

Внимание! Когда ручка потенциометра $R10$ придет в крайнее правое положение, не спешите сразу повысить напряжение на одну ступень с помощью переключателя $S2$. Сначала возвратите ручку потенциометра $R10$ в минимальное (левое) положение. В противном случае напряжение скачком увеличится на значительную величину и может, превысив допустимое значение, вывести диод из строя.

3. Закончив измерения, выключить питание, вернуть потенциометр $R10$ и переключатель $S2$ в положение минимума. Тумблер $S1$ перевести в верхнее положение (для работы с точечными диодами). Заменить плоскостной диод точечным.

4. Включив источник питания, установить его выходное напряжение порядка 50-60 В. Изменяя напряжение через каждые 5 В, записывать показания приборов в таблицу 5.

Таблица 5

$U_{обр}, В$	Тип диода				(обратный ток)							
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	
$I_{обр}, мкА$												

Следить, чтобы не превысить предельно допустимого для точечного диода обратного напряжения. Закончив измерения, уменьшить напряжение до нуля. Выключить питание.

5. Так как обратный ток стабилитрона достаточно велик, снятие его вольтамперной характеристики при обратном включении можно провести на установке 1, поставив миллиамперметр на максимальную чувствительность. Для этого нужно переключатель $S1$ перевести в отключенное положение, переключить стабилитрон в обратной полярности, а на вход подать напряжение порядка 10-12 В.

6. Постепенно увеличивая напряжение, записывать в таблицу 6 значения обратного тока и соответствующие напряжения на стабилитроне. При достижении номинального тока стабилизации (обычно до 5-10 мА) измерения прекратить.

7. Выключить питание. Разобрать установки и сдать лаборанту взятые для исследования диоды.

Таблица 6

$I_{обр}, мА$	Тип стабилитрона									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
$U_{обр}, В$										

6. Обработка результатов исследования

1. На основании данных таблиц 1-6 по аналогии с рисунком 3 построить вольтамперные характеристики изученных приборов. Необходимо правильно подобрать масштабы токов и напряжений, откладываемых вдоль осей в прямом

и обратном направлениях. Для отчета все три характеристики (в разных цветах) изобразить на одном рисунке.

2. Сделать выводы по каждой характеристике.

7. Указания к отчету

Отчет должен содержать следующие материалы:

1. Наименование и цель работы.
2. Внешний вид и цоколевку диодов.
3. Справочные данные исследованных диодов.
4. Схемы исследования.
5. Таблицы измерений.
6. Вольтамперные характеристики.
7. Ответы на контрольные вопросы.

8. Вопросы для подготовки

1. Чем отличаются полупроводники *p*-типа и *n*-типа?
2. Что такое *p-n*-переход?
3. Что представляет собой полупроводниковый диод?
4. Почему при подаче прямого напряжения ток через *p-n*-переход возникает не сразу, а только при достижении напряжения 0,3...0,5 В?
5. Чем объясняется обратный ток диода?
6. В чем отличие точечного диода от плоскостного?
7. Перечислите виды полупроводниковых диодов по назначению.
8. Построить и объяснить особенности вольтамперной характеристики полупроводникового диода.

9. Литература

1. Гершензон Е. М. и др. Радиотехника. Учебное пособие для педвузов. - М.: Просвещение, 1986, с. 84-95.
2. Манаев Е. И. Основы радиоэлектроники. - М.: Радио и связь, 1985, с. 174-181.
3. Молчанов А. П., Занадворов П. Н. Курс электротехники и радиоэлектроники. - М.: Наука, с. 192-222.
4. Прянишников В.А. Электроника: Курс лекций – СПб: Корона принт, 2000.

Лабораторная работа 7

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

Цель работы:

1. Изучить процессы, лежащие в основе работы биполярного транзистора.
2. Научиться измерять параметры транзистора и строить его вольтамперные характеристики.

Содержание работы:

1. Исследование работы биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером.
2. Расчет основных параметров транзистора.

1. Краткие теоретические сведения

Транзистор представляет собой трехслойную структуру (рис. 1, а), из полупроводников чередующейся проводимости: $p-n-p$ (или $n-p-n$). Крайние области называются *эмиттером* (Э) и *коллектором* (К), а средняя область — *базой* (Б). В транзисторе имеются два $p-n$ -перехода: переход между базой и эмиттером называется *эмиттерным $p-n$ -переходом*, а переход между базой и коллектором — *коллекторным $p-n$ -переходом*. Условные обозначения транзисторов $p-n-p$ и $n-p-n$ -структуры приведены на рисунке 1, б, в.

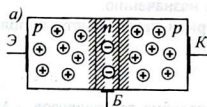


Рис. 1

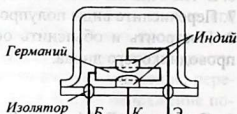
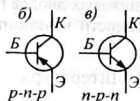


Рис. 2

На рисунке 2 показано устройство германиевого биполярного транзистора. В тонкую пластинку из германия (с электронной проводимостью) с двух сторон вплавлены пластинки индия. За счет диффузии, в процессе вплавления, часть атомов индия проникает в германий, и создаются две области с p -проводимостью, которые образуют два $p-n$ -перехода. К трем пластинкам припаиваются проводники, которые через стеклянные изоляторы выводятся наружу. Корпус служит для предохранения транзистора от пыли, грязи, влаги и одновременно может служить выводом коллектора или базы.

В основе работы транзистора лежат четыре «секрета»:

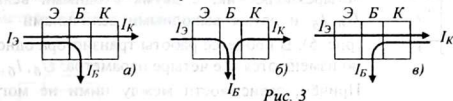
1) Электроны и дырки могут перемещаться без столкновений и взаимодействий на расстояние, превышающее расстояние между ближайшими атомами полупроводника. Это расстояние называется *средней длиной свободного пробега подвижных носителей заряда* и обозначается — λ .

2) Толщина базы сравнима с длиной свободного пробега электронов и дырок. Она сравнима также и с суммарной шириной обоих $p-n$ -переходов. Необходимо учесть также, что при работе транзистора, когда на коллекторный $p-n$ -переход подается обратное напряжение этот переход расширяется и может практически перекрываться с эмиттерным $p-n$ -переходом.

3) При протекании тока через p - n -переход электроны и дырки рекомбинируют друг с другом не точно на границе раздела полупроводников, а до или после границы, то есть, электроны из n -области могут проникать в p -область а дырки – из p -области в n -область на глубину λ . Так как концентрация подвижных носителей заряда в эмиттере во много раз превышает концентрацию подвижных носителей заряда в базе, поэтому из эмиттера в область базы поступает больше носителей заряда, чем из базы в эмиттер.

4) *Закрытый* для основных носителей заряда, p - n -переход, в то же время «прозрачен» для неосновных носителей заряда.

Между тремя выводами транзистора можно организовать три пары токов: а) базовый и коллекторный, б) эмиттерный и коллекторный, в) эмиттерный и базовый, как показано на рисунке 3, а, б, в. Соответственно различают три схемы включения транзистора: схему с общим эмиттером (ОЭ), схему с общей базой (ОБ), схему с общим коллектором (ОК). Среди них наибольшее применение получила схема с общим эмиттером.



На рисунке 4 приведена схема включения транзистора по схеме ОЭ. Источник коллекторного питания $U_К$ включается между коллектором и эмиттером в такой полярности, чтобы коллекторный p - n -переход был закрыт, а эмиттерный – открыт. Источник $U_Б$ включается между базой и эмиттером и служит для создания базового тока через открытый эмиттерный переход.

К эмиттерному p - n -переходу в прямом направлении прикладывается напряжение $U_Б$ порядка десятых долей вольта. Напряжение $U_К$, подаваемое между коллектором и эмиттером, имеет порядок нескольких вольт и является запирающим для коллекторного перехода. При таком включении через эмиттерный переход течет ток $I_Б$, образованный потоком дырок из эмиттера в базу I_p и встречным потоком электронов I_n из базы в область эмиттера:

$$I_Э = I_p + I_n.$$

Так как концентрация дырок в эмиттере во много раз больше концентрации электронов в базе, то $I_p \gg I_n$. Следовательно, базовый ток обусловлен в основном переходом дырок из области эмиттера в область базы: $I_Э = I_p$.

Дырки, попав в базу, для которой они являются неосновными носителями заряда, начинают рекомбинировать с электронами, образуя ток базы $I_Б$. Вследствие того, что концентрация свободных электронов в базе невелика, в создании тока базы участвует лишь незначительная доля прошедших через эмиттерный переход дырок. Основная же часть дырок за счет диффузии проникает

через тонкую область базы и без рекомбинации попадает в зону коллекторного перехода.

Коллекторное напряжение для этих дырок является ускоряющим, и оно увлекает дырки из области базы в направлении коллекторного перехода. Коллекторный переход, закрытый для основных носителей заряда, в то же время прозрачен для неосновных носителей заряда. Поэтому дырки из базы свободно проходят через коллекторный переход и, попав в область коллектора, двигаются дальше, образуя коллекторный ток. Направления токов через транзистор в схеме ОЭ соответствуют рисунку 3, а. При этом ток эмиттера равен сумме коллекторного и базового тока: $I_э = I_к + I_б$. Учитывая, что только незначительная часть дырок рекомбинируют в области базы, получается, что $I_к \gg I_б$. Причем, если базовый ток измеряется микроамперами, коллекторный ток достигает нескольких миллиампер. В этом случае можно считать, что $I_э \approx I_к$.

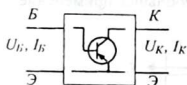


Рис. 5

При расчетах транзистор рассматривают как четырёхполюсник: с двумя входными величинами $U_б, I_б$ и двумя выходными величинами - $I_к, U_к$ (рис. 5). В процессе работы транзистора одновременно изменяются все четыре параметра: $U_б, I_б, I_к, U_к$.

Причём, зависимости между ними не могут быть представлены аналитически, в виде формул или уравнений. Поэтому рассматривают зависимость между двумя величинами при условии постоянства значений двух других величин. Наиболее важными считаются зависимости между входными величинами $I_б = f(U_бэ)$ и между выходными величинами, $I_к = f(U_кэ)$, которые представляются в виде графиков, называемых соответственно *входными и выходными характеристиками*.

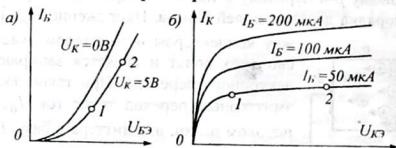


Рис. 6

Вместо того, чтобы строить большое число отдельных графиков, одноименные характеристики совмещают на одном рисунке в виде семейства характеристик. При этом на каждой характеристике указывается условие, при котором она снималась (рис. 6, а, б).

Работа транзистора в качестве усилительного элемента основана на зависимости величины коллекторного тока от величины тока базы. Поэтому основным параметром транзистора является коэффициент передачи по току β , то есть отношение изменения выходного тока к вызвавшему его изменению входного

тока: $\beta = \frac{\Delta I_{вых}}{\Delta I_{вх}}$ при условии $U_к = const$.

Входное и выходное сопротивления транзистора в схеме с общим эмиттером определяются по формулам: $R_{вх} = \frac{\Delta U_б}{\Delta I_б} (U_к = const)$; $R_{вых} = \frac{\Delta U_к}{\Delta I_к} (I_б = const)$.

Приращения токов и напряжений ($\Delta U_б, \Delta I_б, \Delta U_к, \Delta I_к$) определяют для пар точек 1, 2 на линейных участках входной и выходной характеристик транзистора (см. рис. 6, а, б).

2. Описание установки

В работе предлагается снять статические характеристики транзистора $p-n-p$ -структуры, включенного по схеме с общим эмиттером (рис. 7). Исследуемый транзистор тремя выводами вставляется в три гнезда «Э», «Б», «К» схемы, которая после этого превращается в транзисторный усилитель по схеме с общим эмиттером. Схема питается от двух источников питания напряжением 5 В и 12 В. Плавное изменение базового и коллекторного напряжений осуществляется потенциометрами $R2$ и $R3$ и контролируется вольтметрами PUI и $PU2$.

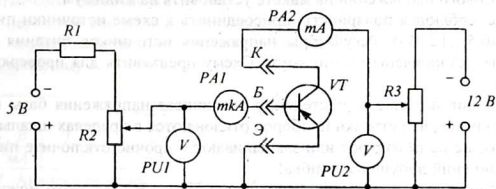


Рис. 7

Следует отметить одну особенность измерения базового напряжения вольтметром PUI . Дело в том, что любой электронизмерительный прибор обладает конечным сопротивлением R_{np} , которое, безусловно, вносит методическую ошибку в измерения. Например, микроамперметр $PA1$ имеет сопротивление, сравнимое с входным сопротивлением транзистора, и поэтому вольтметр PUI не может показать точное значение напряжения между базой и эмиттером, так как базовый ток $I_б$, протекая через микроамперметр, теряет на нём часть напряжения $\Delta U_{np} = I_б \cdot R_{np}$.

Следовательно, чтобы определить истинное напряжение базы, необходимо от показания вольтметра U_B вычесть падение напряжения на сопротивлении микроамперметра, то есть $U_{бэ} = U_B - I_б \cdot R_{np}$, где U_B – показание вольтметра.

В коллекторной цепи сопротивление миллиамперметра $PA2$ мало и намного меньше выходного сопротивления транзистора и потеря напряжения на нем незначительна, поэтому можно считать, что вольтметр $PU2$ показывает истинное значение коллекторного напряжения.

3. Оборудование и приборы

- Лабораторная установка с измерительными приборами:
 - двумя вольтметрами на 1,5 и 15 В;
 - микроамперметром на 500 мкА;
 - миллиамперметром на 20 мА.
- Два источника питания ИЭПП-1 или ИЭПП-2.
- Биполярный транзистор (по указанию преподавателя).
- Соединительные провода и шнуры.

4. Сборка и опробование схемы

1. По справочным данным (см. Приложение 2) найти цоколевку исследуемого транзистора и зарисовать ее в тетрадь. Записать основные паспортные данные транзистора.

2. Соблюдая цоколевку, присоединить транзистор к схеме (к зажимам «Э», «Б», «К»). Первым к схеме подключается вывод базы. Регуляторы коллекторного и базового напряжений на макете установить на минимум.

Так же, соблюдая полярность, присоединить к схеме источники питания (с выхода «0,5...12 В»). Регуляторы напряжения источников питания также должны быть установлены на минимум. Схему предъявить для проверки преподавателю.

3. Включив питание и, постепенно увеличивая напряжения базы и коллектора, убедиться, что стрелки приборов отклоняются в пределах шкалы. Если приборы вообще не реагируют или зашкаливают, - срочно отключите питание: в схеме соединений допущена ошибка!

4. Установить на коллекторе напряжение $U_K = 0$ В (для этого можно второй источник на время измерений отключить). Плавно повышать с помощью потенциометра R_2 напряжение на базе транзистора. Через каждые 0,05 В показания вольтметра P_{U1} и микроамперметра P_{A1} записывать в таблицу 1. Третью строку таблицы – истинные значения напряжения базы – заполнять после вычисления $U_{BЭ}$ по формуле: $U_{BЭ} = U_B - I_B \cdot R_{np}$. Значение внутреннего сопротивления микроамперметра указано на его шкале.

Таблица 1

Напряжение на коллекторе: $U_K = 0$ В										
$U_B, В$	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	...
$I_B, мкА$										
$U_{BЭ}, В$										

При расчетах соблюдать внимательность в обращении с производными единицами: милли-, микро- и так далее.

5. Сняв входную характеристику при нулевом напряжении на коллекторе, в той же последовательности снять входную характеристику транзистора при значении коллекторного напряжения $U_K = 5$ В. Для этого уменьшить базовое напряжение до нуля, включить второй источник питания и установить коллекторное напряжение $U_K = 5$ В. Данные измерений занести в таблицу 2. При измерениях следить, за постоянством значения коллекторного напряжения и не-

прерывно корректировать его. Не допускать, чтобы ток коллектора превысил предельно допустимую величину, указанную в справочных данных транзистора. Таблицу заполнять аналогично таблице 1, вычисляя значения $U_{БЭ}$.

Таблица 2

Напряжение на коллекторе: $U_K = 5 В$										
$U_B, В$	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	...
$I_B, мкА$										
$U_{БЭ}, В$										

6. Семейство выходных характеристик снимается при нескольких фиксированных значениях базового тока. Значения тока базы устанавливают в зависимости от типа транзистора по указанию преподавателя. Характеристики снимаются в следующем порядке:

- установить минимальное напряжение на коллекторе. С помощью потенциометра $R2$ установить нужную величину базового тока;
- плавно, с помощью потенциометра $R3$, увеличивая напряжение коллектора, отмечают значения коллекторного тока;
- перед тем как записать показания миллиамперметра $PA2$, проверить и, в случае необходимости, подкорректировать значение тока базы. Данные записывать в таблицу 3.

Таблицы 3, 4, 5

Величина базового тока: $I_B = \dots мкА$											
$U_K, В$	0	0,1	0,2	0,4	0,6	1,0	2	4	6	8	...
$I_K, мА$											

7. Аналогичные измерения провести для двух оставшихся значений базового тока и данные занести в таблицы 4 и 5, построенные по образцу таблицы 3.

8. По данным измерений построить семейства входных и выходных характеристик. По указанным преподавателем участкам характеристик рассчитать коэффициент передачи, входное и выходное сопротивления транзистора.

5. Указания к отчету

Отчет должен содержать следующие материалы:

1. Наименование и цель работы.
2. Внешний вид, цоколевку и маркировку транзистора.
3. Паспортные данные исследуемого транзистора.
4. Схему исследования.
5. Таблицы измерений.
6. Семейства входных и выходных характеристик транзистора.
7. Вычисленные значения коэффициента передачи, входного и выходного сопротивлений транзистора.
8. Ответы на контрольные вопросы.

6. Контрольные вопросы

1. Какова структура биполярного транзистора и как называются его выводы?
2. Чем отличаются транзисторы *p-n-p* и *n-p-n* структуры?
3. Почему трехслойный транзистор называется биполярным?
4. Что такое «диффузия свободных носителей заряда» и что означает «длина свободного пробега» электронов и дырок?
5. Перечислите способы включения транзистора в схему и их названия.
6. Почему не все, вошедшие из эмиттера, свободные носители зарядов рекомбинируют в базе?
7. Какой должна быть толщина базы биполярного транзистора?
8. Какие пары токов можно организовать в биполярном транзисторе?
9. Какие токи являются входными и выходными в схемах ОЭ, ОБ, ОК?
10. Что такое коэффициент передачи транзистора в схеме с общим эмиттером?
11. Что представляет собой семейство входных характеристик транзистора и при каких условиях они снимаются?
12. Что представляет собой семейство выходных характеристик транзистора и при каких условиях они снимаются?
13. Как вычислить входное и выходное сопротивления транзистора по его входным и выходным характеристикам?

7. Литература

1. Гершензон Е. М. и др. Радиотехника. Учебное пособие для педвузов. - М.: Просвещение, 1986, с. 120 - 131.
2. Манаев Е. И. Основы радиоэлектроники. - М.: Радио и связь, 1985, с. 91 - 121.
3. Молчанов А. П., Занадворов П. Н. Курс электротехники и радиоэлектроники. - М.: Наука, с. 146 - 150.
4. Халиуллин Р.Н. Лабораторный практикум по радиотехнике и радиоэлектронике. Часть I. Электронные приборы и усилители. Ош, 1991.

ИЗУЧЕНИЕ УСТРОЙСТВА И РАБОТЫ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ТРУБКИ

Цель работы:

1. Изучить устройство электронно-лучевой трубки.
2. Познакомиться с принципом получения изображений на экране электронно-лучевой трубки.

Содержание работы:

1. Измерение чувствительности электронно-лучевой трубки.
2. Наблюдение электрических процессов в выпрямителе.

1. Краткие теоретические сведения

Мы привыкли многие физические процессы представлять в виде графика изменения во времени некоторой физической величины, например тока, напряжения, скорости, давления и т.д. Прибор, позволяющий записать (или зарисовать) график изменения измеряемых или контролируемых величин, называют *осциллографом*.

Простейший способ осциллографирования – это механическая запись на равномерно движущуюся ленту из бумаги (например, кардиограмма, сейсмограмма и др.). Более быстрые процессы записываются на фотобумагу (например, нервные импульсы и т.п.). Однако для наблюдения и контроля радиотехнических процессов электромеханические осциллографы непригодны, здесь необходимы безинерционные пишущие устройства, в качестве которых используются электронно-лучевые трубки.

Электронно-лучевыми трубками (ЭЛТ) называют электровакуумные приборы, в которых управляемый электрическими или магнитными полями поток электронов, сформированный в узкий электронный луч, используется для визуального отображения информации на экране. Узкий электронный луч, бомбардируя экран трубки, возбуждает атомы люминесцентного слоя, нанесенного на экран. Получив энергию от электрона, атом люминофора, возвращаясь к исходному состоянию, испускает полученную энергию в виде кванта света определенного цвета свечения. Однако высвечивание атомов люминофора происходит не мгновенно и не одновременно, и поэтому яркость свечения возбужденного электронами участка убывает постепенно, по экспоненциальному закону и через некоторое время (обычно, доли секунды) становится незаметной. Это время называется *временем послесвечения*.

Если быстро перемещать электронный луч, то, те места экрана, в которых побывал луч, продолжают светиться в течение времени послесвечения. Потом этот след исчезает. Управляя движением луча, можно получить на экране изображение в виде светящейся линии, являющейся траекторией движения яркой точки. Эта особенность электронно-лучевых трубок обеспечила им широкое применение в различных областях радиоэлектроники (телевидение, видеотехника, радиолокация, измерительная и цифровая техника).

В узкой цилиндрической части стеклянного баллона, из которого выкачан воздух (рис. 1), размещается *электронная пушка*, формирующая узкий поток электронов, называемый электронным лучом. Электронная пушка представляет

собой устройство, состоящее из катода K , модулятора M и системы анодов $A1$ и $A2$. Катод имеет форму цилиндра, на дно которого нанесен оксидный слой из материала с низкой работой выхода, обеспечивающий электронную эмиссию.

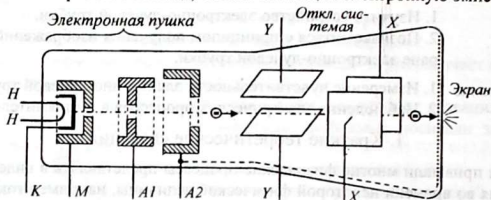


Рис. 1

Катод находится внутри другого цилиндрического электрода с отверстием, называемого модулятором M . На модуляторе устанавливается отрицательный потенциал относительно катода, благодаря чему электроны, вылетающие из катода, прижимаются к оси трубки и выходят лишь через небольшое отверстие в модуляторе плотным потоком. Изменяя потенциал модулятора, можно управлять мощностью электронного потока (аналогично тому, как изменение сеточного напряжения триода влияет на величину его анодного тока). При этом изменяется яркость светового пятна на экране.

Движение электронов в направлении экрана обеспечивается сильным ускоряющим полем анодов $A1$ и $A2$, которые имеют высокий положительный потенциал относительно катода. Поскольку основное ускорение (разгон) электроны получают вблизи катода, где электрические поля обоих анодов имеют одинаковые направления и силовые линии почти не искривлены, то электроны, летящие в сторону анода, не могут сразу осесть на аноды и по инерции пролетают дальше, к экрану. Для этого аноды выполнены в виде полых цилиндров. Попавшие на экран электроны затем по специально нанесенному на внутреннюю поверхность трубки тонкому проводящему слою - аквадагу - стекают на анод (анод $A2$). На рисунке 1 аквадаг показан пунктирной линией.

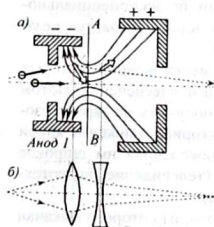


Рис. 2

Наличие двух анодов необходимо не столько для ускорения электронов, но, главное, для фокусировки потока электронов в узкий луч. Форма и размеры анодов подобраны таким образом, чтобы образовавшееся между ними статическое электрическое поле выполняло функцию собирающей линзы. Так как потенциал второго анода больше потенциала первого анода, то первый анод относительно второго анода имеет отрицательный потенциал (как показано на рисунке 2, а).

Электрическое поле внутри анодов получается неоднородным – силовые линии его более кру-

тые внутри первого анода и более пологие во втором (см. рис. 2, а). Линия AB условно делит поле между анодами на две части (левую и правую).

На электрон, влетающий в левую часть поля, действует кулоновская сила $F_K = eE$, направленная по касательной к силовой линии. Если разложить эту силу на продольную и поперечную составляющие, получим две силы – осевую (ускоряющую) $F_{УСК}$ и радиальную (фокусирующую) F_{ϕ} , направленную к оси. Под действием первой силы электрон получает ускорение в направлении второго анода и экрана, а другая сила приближает (прижимает) электроны к оси трубки. Чем дальше отклонился электрон от осевой линии, тем больше сила, возвращающая его к оси. Поэтому левую часть поля (первый анод) можно рассматривать как собирающую электростатическую линзу (см. рис. 2, б).

В правой части поля анодов на электроны также действуют две силы – осевая (ускоряющая) и радиальная (расфокусирующая), направленная от оси. Поскольку на электроны действует сила, удаляющая их от оси, правую часть поля (второй анод) можно сравнить с рассеивающей линзой. Однако в этой части поля силовые линии электрического поля более пологие и потому величина расфокусирующей силы оказывается незначительной. Кроме того, эту часть поля электроны пролетают с большей скоростью и за короткое время не успевают заметно изменить направление своего движения.

Подбирая напряжение между анодами, можно изменять конфигурацию фокусирующего поля и добиться схождения электронов в одной точке, лежащей на оси. При точной фокусировке эта точка совпадает с плоскостью экрана.

На пути электронного луча поставлены под углом 90° друг к другу две пары отклоняющих пластин $Y-Y$ и $X-X$ (рис. 1). Напряжение между этими пластинами создает поперечное электрическое поле, отклоняющее электронный луч в сторону положительно заряженной пластины. Для электронов отклоняющие поля являются поперечными и на продольную скорость электронов не влияют. Пластины $Y-Y$ называются *вертикально-отклоняющими*, а пластины $X-X$ – *горизонтально-отклоняющими* пластинами.

В процессе работы осциллографа на отклоняющие пластины подаются напряжения измеряемых или контролируемых сигналов. При этом величина отклонения электронного луча пропорциональна напряжению сигнала. Например, чтобы отклонить электронный луч вверх, на верхнюю пластину системы $Y-Y$ подают положительное напряжение, а на нижнюю – отрицательное. При этом электроны, пролетая между пластинами, притягиваются к положительной верхней пластине и отталкиваются от отрицательной нижней пластины. Аналогично происходит отклонение электронного луча по горизонтали влево-вправо.

Типовая схема питания электронно-лучевой трубки приведена на рисунке 3. Особенностью схемы питания электронно-лучевой трубки является заземление анода, то есть, потенциал анода принят равным нулю. При этом на катод подается высокое отрицательное напряжение (порядка нескольких сотен вольт). Все электроды электронной пушки электронно-лучевой трубки питаются от одного высоковольтного источника $E1$. Необходимые потенциалы электродов устанавливаются с помощью делителя напряжения на последовательно включенных резисторах $R1, R2, R3, R4$.

Потенциометром $R1$ регулируется яркость свечения экрана. Для этого на модулятор подается отрицательное относительно катода напряжение (обратите внимание на расположение потенциометра и точку подключения катода в цепочке резисторов, составляющих делитель напряжения).

Потенциометром $R3$ производится фокусировка луча. С помощью этого потенциометра регулируется разность потенциалов между анодами $A1$ и $A2$. При изменении напряжения между анодами изменяется конфигурация электрического поля между анодами и изменяется фокусировка электронного луча. Резистор $R4$ устанавливает минимальную разность потенциалов между анодами.

Исследуемые электрические напряжения U_x и U_y подаются к соответствующим пластинам через разделительные конденсаторы $C1$ и $C2$.

С помощью потенциометров $R7$ и $R8$ можно смещать начальное положение светящегося пятна относительно центра экрана. Например, $R7$ регулирует смещение луча («вверх-вниз»), а $R8$ - «влево-вправо». Цепочки $R5C3$ и $R6C4$ выполняют роль фильтров, для этого конденсаторы $C3$ и $C4$ имеют большую емкость. Поэтому постоянные напряжения на отклоняющих пластинах практически не зависят от подаваемых на входы « $Bx.X$ » и « $Bx.Y$ » измеряемых напряжений.

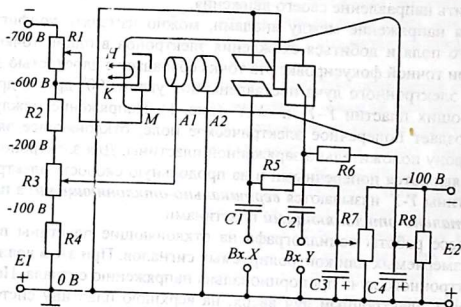


Рис. 3

Одним из важнейших параметров ЭЛТ является **чувствительность**. Чувствительностью электронно-лучевой трубки называется способность трубки давать заметные отклонения электронного луча при незначительных изменениях напряжения между отклоняющими пластинами. Чувствительность измеряют величиной отклонения пятна на экране при изменении разности потенциалов между отклоняющими пластинами на 1 В, то есть, в таких единицах, как мм/В или дел/В.

Так как чувствительность ЭЛТ невелика и непосредственная подача слабого входного сигнала на ее пластины не вызывает заметного отклонения электронного луча, исследуемое напряжение должно предварительно усиливаться в

электронных усилителях вертикального (*УВО*) и горизонтального отклонения (*УГО*) (см. рис. 4). При этом чувствительность электронно-лучевой трубки повышается на несколько порядков.

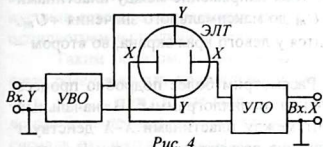


Рис. 4

Если подать переменное напряжение только на «*Вх.У*», на экране будет видна светящаяся вертикальная линия, длина которой пропорциональна амплитуде колебаний приложенного напряжения. Если подать переменное напряжение только на «*Вх.Х*», на экране будет видна светящаяся горизонтальная линия, длина которой пропорциональна амплитуде колебаний приложенного напряжения.

Если подать переменные напряжения на оба входа одновременно, светящаяся точка на экране начнет перемещаться вверх-вниз и влево-вправо, описывая на экране свою траекторию в виде непрерывной кривой линии.

Если частоты обоих напряжений будут равны, то светящаяся точка в каждый период будет описывать одну и ту же траекторию, и на экране будет наблюдаться неподвижное изображение замкнутой кривой в виде окружности или

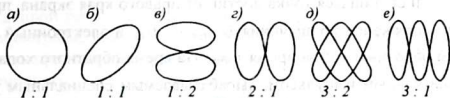


Рис. 5

эллипса (рис. 5, а, б). Неподвижное изображение получается также и в том случае, если частоты сигналов U_x и U_y кратны, то есть, отношение частот $f_x : f_y$ образует рациональную дробь, например: 1 : 2, 2 : 3, 1 : 3, 3 : 4 и так далее. Образующиеся при этом замкнутые кривые называются *фигурами Лиссажу* (рис. 5, а - е).

Чтобы получить временные характеристики электрических сигналов, исследуемое напряжение подается на «*Вх.У*», а на «*Вх.Х*» подается линейно возрастающее напряжение. При этом светящаяся точка на экране равномерно, то есть с постоянной скоростью, движется слева направо. После того, как светящаяся точка достигнет правого края экрана, на пластины *X-X* подается быстро убывающее напряжение. Под действием этого напряжения точка практически мгновенно перемещается справа налево. Для того, чтобы точка при возврате не оставляла след на экране, одновременно на модулятор ЭЛТ подают импульс отрицательной полярности. При этом модулятор не пропускает электроны в сторону экрана и точка на экране не воспроизводится. Это аналогично тому, как при записи конспекта авторучка медленно, касаясь бумаги, движется слева направо, оставляя видимый след в виде строки текста, а при быстром возврате справа налево ручка не касается бумаги и не оставляет следа. Такое периодиче-

ское нарастающее и убывающее напряжение вырабатывает специальный генератор – генератор развертки.

Генератор развертки вырабатывает периодическое переменное напряжение пилообразной формы (рис. 6, а). При этом напряжение между пластинами изменяется от минимального значения $-U_m$ до максимального значения $+U_m$. В первом случае светящаяся точка находится у левого края экрана, во втором – у правого края.

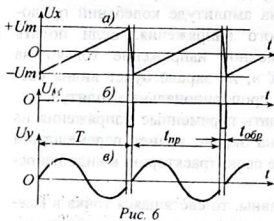


Рис. 6

Рассмотрим более подробно процесс получения осциллограммы: В начальный момент между пластинами $X-X$ действует напряжение развертки $U_{разв} = -U_m$, смещающее световое пятно в левую часть экрана трубки. Затем напряжение между пластинами $X-X$ начинает линейно нарастать и световое пятно на экране совершает равномерное движение слева направо. Это перемещение называется прямым ходом луча и он происходит за время t_{np} .

В момент времени, когда развертывающее напряжение достигает максимума $U_{разв} = +U_m$ и светящаяся точка достигает правого края экрана, происходит резкий спад напряжения до значения $U_{разв} = -U_m$ и электронный луч совершает быстрый обратный ход за время $t_{обр}$. На время обратного хода трубка запирается отрицательным импульсом, вырабатываемым специальным устройством гашения обратного хода луча (рис. 6, б).

Если одновременно с подачей пилообразного напряжения на вход «Вх.Х» на вход «Вх.У» подавать какое-нибудь периодически изменяющееся напряжение, например, синусоидальное, тогда светлая точка на экране, участвуя одновременно в двух движениях (по вертикали и горизонтали), прочерчивает на экране зрительную развертку сигнала (в данном случае - синусоиду). На рисунке 6, в показано, что часть синусоиды во время обратного хода луча на экране не воспроизводится.

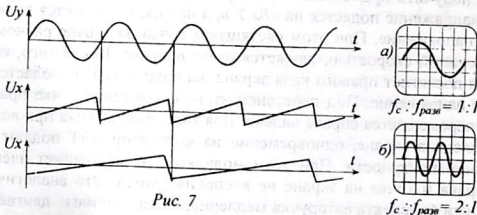


Рис. 7

Если частота развертки строго равна или кратна частоте исследуемого сигнала, на экране будет наблюдаться неподвижное изображение, так как в те-

чение каждого периода развертки луч продельывает на экране один и тот же путь, то есть каждый раз «идет по своему следу». При этом на экране будет видна осциллограмма, то есть график исследуемого напряжения, например синусоида сетевого напряжения. В противном случае устойчивой (неподвижной) осциллограммы получить нельзя.

Таким образом, условием получения неподвижной осциллограммы является равенство или кратность частоты сигнала и частоты развертки, то есть, $f_c : f_{раз} = m : n$, где m, n – целые числа. Если частота сигнала в целое число раз больше частоты развертки, то на экране наблюдается столько периодов сигнала, сколько их укладывается во время прямого хода луча (рис. 7, а, б).

Часто достигнуть строгого равенства $f_c = f_p$ не удастся и тогда изображение «бежит» по экрану, так как каждое следующее изображение получается сдвинутым относительно предыдущего. Для получения устойчивой картины в осциллографах используется синхронизация генератора развертки. Сущность синхронизации заключается в подчинении частоты генератора развертки ЭЛТ частоте исследуемого сигнала. При этом сам сигнал «командует» разверткой электронного луча.

2. Схема исследования

В данной работе предлагается ознакомиться с электронно-лучевой трубкой осциллографа, измерить чувствительность ЭЛТ по вертикали и горизонтали, изучить прохождение и преобразование напряжения в диодном выпрямителе переменного тока. Для исследования предлагается схема выпрямителя переменного тока, построенного по мостовой схеме (рис. 8). С помощью переключателей S2-S6 можно, подключая и отключая отдельные элементы схемы, проверить их назначение и влияние на работу выпрямителя.

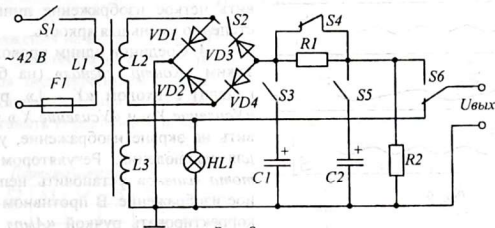


Рис. 8

В зависимости от подключения или отключения тех или иных элементов схемы, на выходе выпрямителя будут действовать переменные, постоянные и пульсирующие напряжения (рис. 9). Наблюдение этих осциллограмм возможно только при подаче исследуемого напряжения непосредственно на отклоняющие пластины (без разделительных конденсаторов). Но так как чувствительность ЭЛТ незначительна, контролируемое напряжение выбрано равным 36...42 В.

3. Оборудование и приборы

1. Электронный осциллограф ОДШ-2.
2. Макет мостового выпрямителя на 40 В.
3. Вольтметр переменного напряжения на 0...50 В.
4. Описание осциллографа.
5. Соединительные провода и шнуры.

4. Сборка и опробование схемы

1. В первую очередь необходимо ознакомиться с осциллографом, найти ручки блока управления лучом.

2. Перед включением осциллографа необходимо установить ручки регуляторов «Яркость» - в крайнее правое положение, «Усиление X», «Фокус», «Вверх-вниз», «Влево-вправо» в среднее положение, переключатель «Развертка» - в положение «1».

3. Соединить шнур питания с сетью и тумблером «Сеть» включить прибор. Через 1-2 минуты на экране должен появиться яркий горизонтальный штрих. Если штрих не появился, чаще всего это является следствием неправильной начальной установки луча (за пределами экрана ЭЛТ). Для установки луча в середине экрана необходимо поворачивать ручку регулятора «Влево-вправо» из одного крайнего положения в другое, каждый раз изменяя положение регулятора «Вверх-вниз» на $20-30^\circ$, пока штрих не появится на экране. Затем ручкой «Фокус» установить четкое изображение линии, постепенно уменьшая яркость.

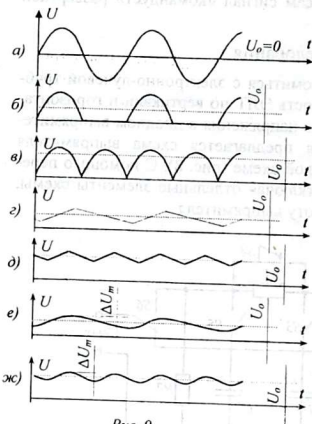


Рис. 9

4. Соединив одним проводником зажим «Контр. сигнал» (на боковой панели) с входом «Y - ⊥», ручками «Усиление Y» и «Усиление X» установить на экране изображение, удобное для наблюдения. Регулятором «Частота плавно» установить неподвижное изображение. В противном случае корректировать ручкой «Ампл. синхр.

». Если на экране получилось устойчивое изображение правильной синусоиды, - то прибор готов к работе.

Замечание. Не следует надолго оставлять луч (пятно) на экране прибора неподвижным при большой яркости, так как это приводит к прожогу люминофора ЭЛТ. По возможности пользоваться небольшой яркостью.

5. После выключения прибора, установленные регулировки не трогать.

5.1. Измерение чувствительности электронно-лучевой трубки.

1. Чтобы на пластины ЭЛТ подать переменное синусоидальное напряжение, переключатель *S6* в исследуемом выпрямителе поставить в положение «Выключено». При этом на выход выпрямителя будет подаваться переменное напряжение, индуцированное в обмотке *L3*. Подключить к выходным выводам выпрямителя вольтметр, включить питание выпрямителя и измерить действующее значение переменного напряжения $U_{\text{вх}}$.

2. На задней стенке осциллографа найти выводы отклоняющих пластин ЭЛТ. С помощью переключателей (там же, на задней стенке) отключить выводы «X-X» и «Y-Y» от усилителей. Выводы отклоняющих пластин «X-X» соединить с выходом выпрямителя.

Получив на экране горизонтальную линию, измерить и записать длину этой линии в делениях клетки (или в миллиметрах).

3. По полученным данным вычислить чувствительность ЭЛТ по горизонтали. Чувствительность ЭЛТ по горизонтали определяется по формуле:

$$\gamma_x = \frac{l}{2U_{\text{вх}}\sqrt{2}}$$

где l - длина светящейся линии. $U_{\text{вх}}$ - действующее значение напряжения на входе «X-X». Коэффициент $\frac{1}{\sqrt{2}}$ необходим для перехода от амплитудного значения напряжения к его эффективному значению. Если нет возможности измерить $U_{\text{вх}}$, принять входное напряжение равным $U_{\text{вх}} = 36$ В.

4. То же самое провести, подключив выпрямитель к пластинам «Y-Y». Вычислить чувствительность ЭЛТ по вертикали

$\gamma_y = \frac{h}{2U_{\text{вх}}\sqrt{2}}$, где h - высота светящейся линии, $U_{\text{вх}}$ - действующее значение напряжения на входе «Y-Y» (36 вольт).

5.2. Наблюдение формы непрерывных сигналов. Оставив выход выпрямителя подключенным к пластинам «Y-Y», подключить горизонтально-отклоняющие пластины к усилителю развертки. (на задней стенке осциллографа). Поставить переключатель частоты развертки в положение «1».

Таблица 1

№ п/п	Переключатели						Вид осциллограммы
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	
1	+						рис. 9, а
2	+			+		+	рис. 9, б
3	+	+		+		+	рис. 9, в
4	+				+	+	рис. 9, г
5	+	+			+	+	рис. 9, д
6	+		+		+	+	рис. 9, е
7	+	+	+		+	+	рис. 9, ж

Включив приборы, установить частоту генератора развертки, чтобы получить на экране неподвижное изображение 2-3 периодов синусоиды.

Включая и выключая с помощью переключателей *S2-S6* отдельные элементы выпрямителя, наблюдать и зарисовать осциллограммы, идентичные изображенным на рисунке 9. Рекомендуемая последователь-

ность включения переключателей *S2-S6* дана в таблице 1.

Коэффициент пульсации напряжения выпрямленного тока вычислять по формуле: $K_{\Pi} = \frac{U_m}{U_o} 100\%$, где U_m - амплитуда переменной составляющей, U_o - величина постоянной составляющей. Обе величины измеряются в делениях сетки экрана ЭЛТ или в миллиметрах.

Выключить приборы и разобрать схему. Не забудьте тумблер выключения отклоняющих пластин «Y-Y» (на задней стенке) вернуть на место.

6. Указания к отчету

Отчет должен содержать следующие материалы:

1. Наименование и цель работы.
2. Назначение, устройство и принцип работы электронно-лучевой трубки.
3. Принцип фокусировки электронного луча.
4. Принцип получения изображений в осциллографах.
5. Вычисления чувствительности осциллографа.
6. Схему исследуемого выпрямителя.
7. Осциллограммы входных и выходных напряжений выпрямителя.
8. Ответы на контрольные вопросы.

7. Вопросы для подготовки

1. Объяснить устройство электронно-лучевой трубки с электростатическим отклонением и указать назначение ее электродов.
2. Что такое «электронная пушка»?
3. Как осуществляется питание электронно-лучевой трубки?
4. Как происходит фокусировка электронного луча?
5. Почему для развертки в осциллографах используют напряжения пилообразной формы?
6. Что такое чувствительность ЭЛТ? В каких единицах измеряется и для чего используется?
7. Принцип получения неподвижного изображения на экране осциллографа. Что необходимо для этого?
8. Можно ли использовать осциллограф для измерения постоянного напряжения?

8. Литература

1. Данилов И. А, Иванов П. М. Общая электротехника с основами электроники. Электроника. Программированное учебное пособие. – М.: Высшая школа, 1983.
2. Евсюков А. А. Электронное оборудование по физике. Пособие для учителей. – М.: Просвещение, 1977.
3. Халиуллин Р.Н. Лабораторный практикум по радиотехнике и радиоэлектронике. Часть I. Электронные приборы и усилители. Ош, 1991.

Лабораторная работа 9

РАДИОИЗМЕРЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОННОГО ОСЦИЛЛОГРАФА

- Цель работы:**
1. Познакомиться с принципами измерения электрических величин с помощью осциллографа.
 2. Научиться измерять параметры радиотехнических сигналов с помощью осциллографа.

- Содержание работы:**
1. Измерение электрических величин с помощью осциллографа.

1. Краткие теоретические сведения

Радиоизмерительным прибором называется электроизмерительный прибор, предназначенный для измерения слабых сигналов. Главным признаком радиоизмерительного прибора является наличие электронного усилителя.

Электронный осциллограф является универсальным радиоизмерительным прибором, позволяющим проводить *измерение* различных электрических величин: силы тока, напряжения, частоты, периода, сдвига фазы, амплитуды и длительности импульсов. Другим достоинством осциллографа является возможность одновременного *наблюдения* за формой исследуемых электрических импульсов и сигналов.

Осциллограф, основной частью которого является электронно-лучевая трубка, предназначен для исследования периодических электрических сигналов различной формы и частоты. Он позволяет исследовать форму электрических колебаний (синусоидальных, несинусоидальных, импульсных). Вид осциллограмм тока и напряжения позволяет судить об их амплитуде, частоте, фазе, глубине модуляции и т. п.

Осциллограф является сложным электронным устройством. Он состоит из электронно-лучевой трубки (ЭЛТ), блока управления электронным лучом (БУЛ), усилителя вертикального отклонения луча (УВО), усилителя горизонтального отклонения луча (УГО), генератора развертки (ГР) и блока питания (БП) - выпрямителя для питания различных цепей осциллографа (рис. 1).

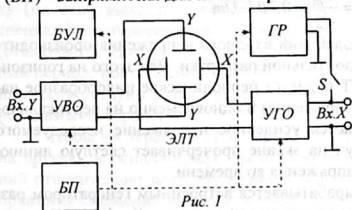


Рис. 1

Блок управления электронным лучом (БУЛ) предназначен для установки яркости свечения точки на экране, фокусировки электронного луча (минимального размера светящегося пятна на экране ЭЛТ), а также установки начального положения точки в нужной части экрана (например, в центре экрана). Блок БУЛ имеет 4

ручки настройки: «Яркость», «Фокусировка», «Вправо-влево» и «Вверх-вниз».

Одним из важнейших параметров осциллографа является чувствительность. **Чувствительностью** осциллографа называется способность давать за-

метные отклонения электронного луча при незначительных изменениях измеряемого напряжения. Чувствительность измеряют величиной отклонения пятна на экране при изменении входного напряжения на 1 В, то есть, в таких единицах, как мм/В или дел/В. Чувствительность обычно измеряют по входу вертикального отклонения «Y - Y».

Так как чувствительность ЭЛТ невелика и имеет значение порядка 0,1-0,5 мм/В, непосредственная подача на отклоняющие пластины слабого входного сигнала, измеряемого в милли- и микровольтах, не вызывает заметного отклонения электронного луча. Поэтому исследуемое напряжение должно предварительно усиливаться в электронных усилителях вертикального отклонения (УВО) (см. рис. 1).

Чувствительность осциллографа зависит от коэффициента усиления усилителя, и чем больше коэффициент усиления усилителя, тем выше чувствительность осциллографа. Чувствительность осциллографа измеряют при максимальном коэффициенте усиления УВО. При этом входное напряжение имеет величину в несколько милливольт или микровольт. Для того чтобы при подаче более сильных сигналов изображение не выходило за рамки экрана, входной сигнал ослабляют в отношении 1:10, 1:100, 1:1000 и так далее с помощью входного делителя напряжения. Кроме того, имеется плавная регулировка уровня входного напряжения.

Знание чувствительности осциллографа позволяет вычислять амплитуду измеряемого напряжения по величине отклонения луча h на экране ЭЛТ (рис. 2).

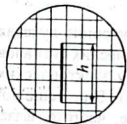


Рис. 2

$$U_m = \frac{h}{2ny}$$

где γ_y - чувствительность канала вертикального отклонения;

n - коэффициент деления входного делителя ($n = 1, 1/10, 1/100, 1/1000, \dots$). При этом регулятор плавной регулировки входного напряжения находится на максимуме.

Эффективное (действующее) значение напряжения находят через амплитудное напряжение по формуле:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \approx 0,707 \cdot U_m$$

Получение осциллограммы колебаний входного напряжения производится с помощью вертикальной и горизонтальной развертки. Для этого на горизонтально-отклоняющие пластины ЭЛТ подается периодическое пилообразное напряжение (линейно нарастающее напряжение) и одновременно на вертикально-отклоняющие пластины ЭЛТ подается усиленное напряжение исследуемого сигнала. При этом электронный луч на экране прочерчивает светлую линию, повторяющую график изменения напряжения во времени.

Пилообразное напряжение вырабатывается встроенным генератором развертки, который при необходимости подключается к входу «X - X» или отключается выключателем S, если развертка не нужна (см. рис. 1).

Если частота сигнала совпадает с частотой развертки или кратна ей, то есть, $f_c : f_{разв} = m : n$, где m, n – целые числа, то после каждого периода развертки луч начинает рисовать график с одной и той же точки на экране и новое изображение каждый раз совпадает с изображением, построенным ранее. Таким образом, условием получения неподвижной осциллограммы является равенство или кратность двух частот: частоты сигнала и частоты развертки.

Для получения устойчивой картины, то есть, соблюдения кратности частот $m f_c = n f_{разв}$, в осциллографах используется синхронизация. Сущность синхронизации заключается в том, что исследуемый сигнал сам управляет работой генератора развертки. Синхронизация может осуществляться тремя способами: *от сети* (50 Гц), *внутренняя* (самим сигналом) или *внешняя* (от отдельного источника).

Обычная электронно-лучевая трубка рассчитана на воспроизведение осциллограммы одного, отдельно взятого сигнала. Однако, с целью обеспечения возможности одновременного наблюдения двух и более сигналов, в некоторых осциллографах применяется электронная коммутация. Принцип работы коммутатора заключается в том, что он поочередно на короткие отрезки времени подключает к входу осциллографа то один, то другой сигнал (см. рис. 3, а).

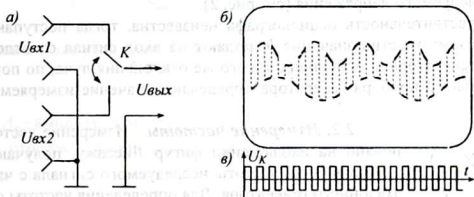


Рис. 3

Поскольку механический коммутатор не может работать с высокой частотой, в осциллографах применяется безинерционный электронный коммутатор, состоящий из двух одинаковых усилителей, работающих на общую нагрузку (на один выход). Прямоугольные импульсы (рис. 3, в), вырабатываемые специальным генератором – мультивибратором в один полупериод запирают (отключают) один усилитель, а в следующий полупериод – другой, и так каждый период: попеременно – то один, то второй... (см. рис. 3, б). Пунктирные линии соответствуют резким перемещениям электронного луча – они практически невидимы на экране.

Чтобы на экране ЭЛТ не происходило наложения одной осциллограммы на другую, в осциллографе предусмотрена возможность смещения изображений относительно друг друга (вверх или вниз) путем подачи постоянного напряжения смещения на тот или иной усилитель. Очевидно, что такое «двухлучевое» воспроизведение осциллограмм возможно только при достаточно низких частотах исследуемых сигналов.

При исследовании двух и более сигналов одинаковой частоты применяется череспериодное коммутирование, которое заключается в том, что в один период развертки воспроизводится полный период одного сигнала, в следующий период – воспроизводится полный период второго и так далее.

Иногда развертку осуществляют напряжением двух независимых внешних источников сигнала, подаваемых одновременно на обе пары отклоняющих пластин. В случае кратности частот обоих сигналов на экране возникает неподвижное изображение, имеющее форму окружности, эллипса и других сложных замкнутых кривых. На основе анализа этих кривых можно сравнивать частоту сигналов, фазовый сдвиг между ними и другие параметры сигналов.

Осциллограф является универсальным измерительным прибором и применяется для разнообразных измерений. Осциллограф незаменим при налаживании, ремонте и регулировке радиоэлектронной аппаратуры.

2. Применение осциллографа для радиотехнических измерений

2.1. Измерение напряжений. Измерение напряжений основано на зависимости величины отклонения электронного луча от приложенного к отклоняющим пластинам напряжения. При этом, зная чувствительность осциллографа можно по высоте осциллограммы вычислить амплитудное и эффективное значение исследуемого напряжения (см. рис. 2).

Если чувствительность осциллографа неизвестна, тогда поступают следующим образом: отметив значение h , подают на вход сигнал от отдельного образцового генератора и, добившись такого же отклонения луча, по показаниям измерительного прибора генератора определяют значение измеряемого напряжения.

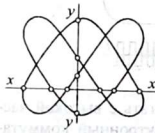


Рис. 4

2.2. Измерение частоты. Измерение частоты основано на наблюдении фигур Лиссажу, получающихся при сравнении частоты исследуемого сигнала с частотой эталонного генератора. Для определения частоты сигнала сначала зарисовывают полученную фигуру, затем рассекают её горизонтальной ($x-x$) и вертикальной ($y-y$) прямыми, причем эти прямые не должны проходить через узлы фигуры (см. рис. 4). Отношение числа пересечений фигуры с горизонтальной и вертикальной линиями равно отношению частот напряжений, подведенных к вертикально- и горизонтально-отклоняющим пластинам:

$$\frac{n_x}{n_y} = \frac{f_y}{f_x}$$

Если известна, например, частота напряжения на горизонтально отклоняющих пластинах, то измеряемая частота

$$f_y = \frac{n_x}{n_y} f_x$$

Для фигуры Лиссажу, приведенной на рисунке 4, при условии $f_x = 50$ Гц

$$f_y = \frac{6}{4} \cdot 50 = 75 \text{ Гц}.$$

2.3. **Измерение угла сдвига фазы.** Измерение сдвига фазы между двумя напряжениями одинаковой частоты, производится также по фигурам Лиссажу, образующимся при одновременной подаче сигналов на оба входа осциллографа. Ввиду полного совпадения частот, изображение на экране всегда получается неподвижным. При этом возможны три случая:

1) если на экране наблюдается прямая линия, то сдвиг фаз равен 0° или 180° (рис. 5, а, б);

2) если фигура Лиссажу получается в форме окружности или эллипса с осями, параллельными осям координат, то сдвиг фаз равен 90° (рис. 5, в, з, д);

3) если фигура, получившаяся в виде эллипса, никакими манипуляциями ручек «Усиление X» и «Усиление Y» не приводится к окружности, в этом случае угол сдвига фаз лежит между 0° и 90° (рис. 5, е), либо между 90° и 180° (рис. 5,

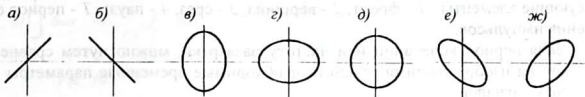


Рис. 5

ж). В общем случае угол сдвига фаз φ находят по формуле:

$$\sin \varphi = \frac{a_x}{A_x}$$

где A_x - амплитуда отклонения луча по горизонтали,

a_x - отрезок горизонтальной линии, проходящей через центр эллипса

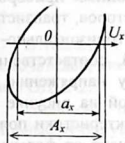


Рис. 6

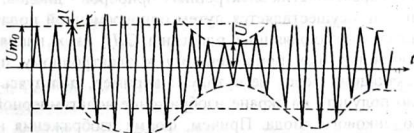


Рис. 7

2.4. **Измерение коэффициента амплитудной модуляции.** Измерение коэффициента амплитудной модуляции основано на сравнении величин минимальной и максимальной амплитуд модулированного сигнала (рис. 7). Коэффициент модуляции равен

$$m = \frac{\Delta U_m}{U_{m0}}$$

где ΔU_m - максимальное изменение амплитуды несущих колебаний, U_{m0} - амплитуда несущих колебаний при отсутствии модуляции. Однако, чтобы из-

мерить величины ΔU_m и U_{mo} требуется два опыта (с модуляцией и без нее). Поэтому коэффициент модуляции вычисляются по формуле:

$$m = \frac{U_{m_{max}} - U_{m_{min}}}{U_{m_{max}} + U_{m_{min}}}$$

Величины максимальной ($U_{m_{max}}$) и минимальной ($U_{m_{min}}$) амплитуд измеряются непосредственно по сетке на экране ЭЛТ.

2.5. *Измерение параметров электрических импульсов.* Измерение параметров электрических импульсов заключается в определении формы, длительности импульса, времени нарастания, интервала (паузы) между импульсами и т. п. Осуществляется это фотографированием (или перечерчиванием на бумагу) изображения с экрана осциллографа и сводится к сравнению отдельных частей осциллограммы в отношении длительности, амплитуды, формы и т. д.

На рисунке 8 изображены два соседних импульса. Каждый импульс имеет следующие элементы: 1 - фронт, 2 - вершина, 3 - срез, 4 - пауза, T - период следования импульсов.

Зная период колебаний или частоту развертки, можно путем сравнения отрезков на изображении определить необходимые временные параметры импульсных сигналов.

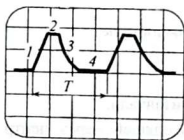


Рис. 8

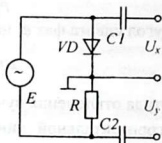


Рис. 9

2.6. Снятие вольтамперных характеристик электронных приборов.

Снятие характеристик электронных приборов - диодов, тиристоров, транзисторов и т. п. осуществляется путем одновременной подачи на горизонтально- и вертикально-отклоняющие пластины ЭЛТ двух напряжений, соответственно пропорциональных приложенному к электронному прибору напряжению и протекающему через него току. Например, пользуясь схемой на рисунке 9, можно получить на экране изображение вольтамперной характеристики полупроводникового диода. Причем, форма изображения не зависит от формы и частоты питающего цепь напряжения, которое даже можно взять переменным.

3. Схемы исследования

В данной работе предлагается ознакомиться с осциллографом, измерить его входную чувствительность по каналам вертикального и горизонтального отклонения, наблюдать прохождение и преобразование напряжения в цепях переменного тока и научиться измерять частоту методом фигур Лиссажу. Для исследования предлагаются частотнозависимые и фазосдвигающие RC- и LC-цепочки (рис. 10, 11). Среди них: простейшие, дифференцирующие и интегри-

рующие RC -цепочки, обеспечивающие положительный или отрицательный сдвиг фазы до $60^\circ \dots 70^\circ$ (рис. 10, а, б).

Комбинация интегрирующих и дифференцирующих цепочек, образующих двойной T -образный RC -мост (рис. 11, а), обеспечивает отсутствие сдвига фазы только на одной определенной частоте $\omega_0 = \frac{1}{RC}$, которая называется частотой настройки RC -фильтра. На частотах выше и ниже ω_0 сопротивление моста комплексно и имеет место сдвиг фазы выходного напряжения, как в положительную, так и в отрицательную сторону относительно входного напряжения.

По указанию преподавателя может быть предложен мостовой LC -фазовращатель (рис. 11, б).

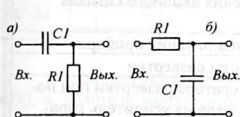


Рис. 10

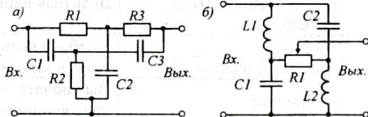


Рис. 11

4. Оборудование и приборы

1. Электронный осциллограф ОДШ-2 или (или С1-83).
2. Низкочастотный генератор ЗГ-2А.
3. Генератор низкой частоты ГЗШ-63.
4. Фазосдвигающие и фазовращающие RC -цепочки.
5. Установка для снятия характеристик диодов и транзисторов.
6. Электронный вольтметр ВЗ-38.
7. Соединительные провода и шнуры.

5. Сборка и опробование схемы

В таблице 1 приведены обозначения и назначение ручек управления, переключателей, гнезд ввода и вывода школьного демонстрационного осциллографа ОДШ-2.

Пользуясь таблицей необходимо ознакомиться с осциллографом, найти основные ручки управления и выяснить их назначение.

Перед включением осциллографа необходимо установить ручки регуляторов «Яркость» - в крайнее правое положение, «Усиление X », «Фокус», «Вверх-вниз», «Влево-вправо», и «Ампл. синхронизации» - в среднее положение, переключатели «Развертка» - в положение «1», «Синхронизация» - в положение «Внутр.». Соединить одним проводником зажим «Контр. сигнал» (на боковой панели) с входом « Y -1».

Таблица 1

№	Обозначение ручек управления, входов и выходов	Назначение	
<i>На лицевой панели</i>			
1.	«Яркость»	Регулировка яркости свечения экрана	
2.	«Фокус»	Фокусировка луча	
3.	«Вверх-вниз»	Смещение луча по вертикали	
4.	«Влево-вправо»	Смещение луча по горизонтали	
5.	«Усиление Y»	Плавная регулировка чувствительности усилителя вертикального отклонения	
6.	Кнопочный переключатель «1:1», «1:10», «1:100», «1:1000»	Делитель напряжения входного сигнала	
7.	«Сеть»	Тумблер включения питания прибора	
8.	«Частота плавно»	Регулировка частоты развертки	
9.	Кнопочный переключатель «Выкл», «1», «2», «3», «4».	Выключатель генератора развертки при подаче входного сигнала на усилитель горизонтального отклонения и установка частоты горизонтальной развертки	
10.	«Усиление X»	Плавная регулировка чувствительности усилителя горизонтального отклонения	
11.	«Синхронизация» Переключатель «внешн. -внутр.»	Переключатель режимов синхронизации развертки	
12.	«Ампл. синхр.»	Регулятор уровня синхронизации	
13.	Входные гнезда	«Y»-«L»	Вход усилителя вертикального отклонения
14.		«X»-«L»	Вход усилителя горизонтального отклонения
15.		«Внешн. синхр.»	Гнездо подключения источника синхронизирующих импульсов
<i>На боковой панели</i>			
16.	«Коммут. -Усиление»	Тумблер включения и выключения электронного коммутатора	
17.	«Вход 1», «Вход 2»	Входы двухканального коммутатора	
18.	«Контр. сигнал»	Выход контрольного сигнала 6,3 В, 50 Гц	
19.	«Усиление 1» «Усиление 2»	Раздельная регулировка усиления входных напряжений при двухканальном режиме работы осциллографа	
20.	«Смещение»	Смещение изображений двух сигналов относительно друг друга	
<i>На задней панели</i>			
21.	«Y», «X» - «Усилитель»	Тумблеры отключения пластин ЭЛТ от усилителей УВО и УГО	
22.	«Y», «X»	Входы для подачи сигналов непосредственно на пластины ЭЛТ	

Включить прибор и, как только, после прогрева, на экране появится изображение, ручками «Усиление Y» и «Усиление X» установить на экране размеры изображения, не выходящие за пределы экрана.

Ручкой «Частота плавно» установить неподвижное изображение. В противном случае корректировать ручкой «Ампл. синхр.». Если на экране получилось устойчивое изображение правильной синусоиды, - прибор готов к работе.

6. Эксперименты и измерения

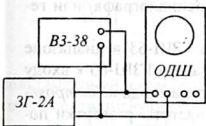


Рис. 12

6.1. Измерение входной чувствительности осциллографа. Чувствительность каналов вертикального и горизонтального отклонения может быть неодинаковой. Поэтому сначала необходимо определить чувствительность одного, например, канала вертикального отклонения, а затем - горизонтально. Для этого собирают схему согласно рис. 12.

Выход генератора ЗГ-2А соединить с входом вертикального отклонения «Y-1», делитель напряжения поставить в положение «1:1000», регулятор чувствительности «Усиление Y» - в крайнее левое положение. Параллельно выходу генератора подключить электронный вольтметр ВЗ-38.

Включив приборы, установить частоту генератора 200 Гц и выходное напряжение порядка 10-15 мВ. Непрерывно наблюдая за экраном осциллографа, постепенно довести ручку регулятора чувствительности «Усиление Y» вправо до упора. Если отклонение луча недостаточно, переключить входной делитель в положение «1:100», «1:10» и наконец, «1:1». При необходимости уменьшить выходное напряжение генератора.

Выключить развертку нажатием клавиши «Выкл.» и, измеряя по градуированной сетке длину светящейся вертикальной линии, записать в таблицу 2 значения значений входного напряжения, дающих

№ n/n	U _{вх} , мВ	h, дел	γ(y) дел/В	γ(y) ср

Таблица 2

№ n/n	U _{вх} , мВ	l, дел	γ(x) дел/В	γ(x) ср

Таблица 3

ся по формуле

$$\gamma = \frac{h}{2U_{вх} \sqrt{2}}$$

где h - длина светящейся линии.

Коэффициент $\frac{l}{\sqrt{2}}$ необходим для перехода от амплитудного значения напряжения к эффективному.

Переключив генератор на вход горизонтального отклонения «X - 1», повторить аналогичные измерения при максимальной чувствительности и заполнить таблицу 3.

Следует учесть, что чувствительность осциллографа по этому каналу намного ниже, чем по вертикальному, поэтому напряжение генератора нужно увеличить.

Выключить приборы и разобрать соединения.

6.2. Измерение частоты методом фигур Лиссажу. Сущность метода заключается в одновременной подаче на входы каналов вертикального и горизонтального отклонения двух сигналов, частота одного из которых известна. В качестве источника опорной частоты можно использовать выход «Контрольный сигнал» сетевой частоты 50 Гц (на боковой панели осциллографа) или генератор с точной шкалой частоты – ЗГ-2А.

Вначале нужно проверить градуировку генератора ГЗШ-63 в диапазоне 20...200 Гц. Для этого присоединить выход «5 Ом» генератора ГЗШ-63 к входу осциллографа «Y - ⊥», на вход «X - ⊥» подать напряжение с выхода «Контрольный сигнал» осциллографа. Переключатель диапазонов частоты развертки поставить положение «Выкл». Включить приборы и, управляя ручками «Усиление Y» и «Усиление X», получить на экране светящийся квадрат.

Плавно изменяя частоту генератора, добиваться получения на экране неподвижных изображений замкнутых кривых, аналогичных кривым, показанным на рисунке 13. Записать значения шкалы генератора, соответствующие частотам 25, 50, 75, 100, 150, 200 Гц.

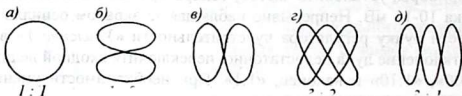


Рис. 13

По заданию преподавателя, используя генератор стандартных частот ЗГ-2А, проверить градуировку шкалы генератора ГЗШ-63 на всех трех диапазонах: « $\times 1$ », « $\times 10$ », « $\times 100$ » и заполнить таблицу 4. В таблице против оцифрованных делений шкалы записать точные значения частоты генератора.

Таблица 4

ГЗШ-63	20	30	40	50	60	80	100	200
« $\times 1$ ».								
« $\times 10$ »								
« $\times 100$ »								

6.3. Измерение сдвига фаз двух напряжений. Через фазовращающую цепочку ФВ (предложенную преподавателем) соединить между собой входы осциллографа «Y - ⊥» и «X - ⊥» (рис. 14). Переключатель частоты развертки поставить в положение «Выкл.». К входу «Y - ⊥» подключить генератор.

Включить приборы и после прогрева получить на экране четкое неподвижное изображение эллипса. С помощью ручек «Влево - вправо» и «Вверх - вниз» расположить изображение в центре экрана. Установить частоту генерато-

ра равной 1000 Гц. Изменяя сопротивление резистора $R1$, добиться максимального сдвига фазы в положительную или отрицательную сторону.

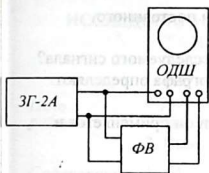


Рис. 14

Изменяя частоту колебаний генератора, наблюдать за формой эллипса. Записать в таблицу 5 шесть различных значений частоты и соответствующие величины A_x и a_x (см. рис. 6). По полученным данным вычислить угол сдвига фазы по формуле $\sin \varphi = \frac{a_x}{A_x}$. Сделать выводы.

6.4. **Снятие вольтамперной характеристики диода.** Вместо фазовращающей цепочки подключить макет установки для осциллографирования вольтамперной характеристики диода (см. рис. 9). Подключить выход генератора к соответствующим гнездам макета.

Включить приборы, отрегулировать положение и размеры полученного изображения. Зарисовать полученную характеристику. Убедиться, что характер изображения не зависит от частоты генератора.

Таблица 5

Измерения	1	2	3	4	5	6
частота, f , Гц						
размах A_x , мм						
диаметр эллипса, a_x , мм						
$\sin \varphi$						
φ , градус						

7. Указания к отчету

Отчет должен содержать следующие материалы:

1. Наименование и цель работы.
2. Блок-схему осциллографа.
3. Принципы «двухлучевого» режима работы осциллографа.
4. Таблицы измерения чувствительности осциллографа.
5. Фигуры Лиссажу и их объяснение.
6. Градуировку генератора ГЗШ-2.
7. Схему фазовращателя и сдвиг фазы на фиксированных частотах.
8. Ответы на контрольные вопросы.

8. Вопросы для подготовки

1. Что такое «радиоизмерительный прибор»?
2. Два достоинства осциллографа.
3. Из каких основных частей и блоков состоит осциллограф?
4. Почему для развертки в осциллографах используют напряжения пилообразной формы?

5. Что такое чувствительность осциллографа? В каких единицах измеряется и для чего используется?
6. Можно ли использовать осциллограф для измерения постоянного напряжения?
7. Как с помощью фигур Лиссажу измерить частоту исследуемого сигнала?
8. По какому признаку изображения на экране осциллографа определяют сдвиг фазы между током и напряжением?
9. Что такое электронный коммутатор? Для какой цели он применяется и каков принцип его работы?

9. Литература

1. Данилов И. А., Иванов П. М. Общая электротехника с основами электроники. Электроника. Программированное учебное пособие. — М.: Высшая школа, 1983.
2. Евсюков А. А. Электронное оборудование по физике. Пособие для учителей. — М.: Просвещение, 1977.
3. Халиуллин Р.Н. Лабораторный практикум по радиотехнике и радиоэлектронике. Часть I. Электронные приборы и усилители. Ош, 1991.

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗИСТОРНОГО УСИЛИТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ.

Цель работы:

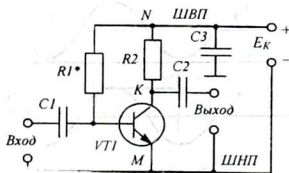
1. Изучить принцип работы резисторного усилителя, назначение отдельных элементов схемы.
2. Исследовать основные параметры резисторного усилителя.
3. Выяснить роль обратной связи в усилителях.

Содержание работы:

1. Исследование резисторного усилителя напряжения низкой частоты на биполярном транзисторе.

1. Краткие теоретические сведения

Усилителем называется электронное устройство, в котором происходит усиление сигнала по току, напряжению и мощности. В зависимости от этого различают *усилители тока, усилители напряжения, усилители мощности*. В практических радиоэлектронных устройствах (радиоприемниках, магнитофонах, и т.п.) наиболее часто встречается схема усилителя напряжения на транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером.



Простейший усилительный каскад на биполярном транзисторе может быть построен по следующей схеме (рис. 1). Усиливаемое входное напряжение через разделительный конденсатор $C1$ подается между базой и эмиттером, а усиленное напряжение снимается с коллектора транзистора и через разделительный конденсатор $C2$ подается на выходные зажимы.

Конденсаторы $C1$ и $C2$ выполняют одинаковую роль: они хорошо пропускают полезный переменный ток и защищают последующие цепи от проникновения высокого постоянного напряжения, например с коллектора одного транзистора на базу следующего.

Запомните: Транзистор работает только тогда, когда через него течет базовый ток. Увеличение или уменьшение базового тока приводит к соответствующему изменению коллекторного тока.

Резистор $R1$ устанавливает начальный базовый ток таким, чтобы при любых изменениях входного напряжения базовый ток изменялся около среднего значения $I_{б0}$ и не оказался равным нулю. Величина начального базового тока

$I_{\text{б0}}$ подбирается в зависимости от величины входного сигнала. Чем больше амплитуда входного сигнала, тем больше должен быть начальный базовый ток. Поэтому величина сопротивления резистора $R1$ для каждого транзистора подбирается экспериментально (об этом свидетельствует «звездочка» - $R1^*$).

Расчет величины начального тока базы производится по формуле:

$$I_{\text{б0}} = \frac{E_{\text{к}}}{R1 + r_{\text{бэ}}}, \text{ где } r_{\text{бэ}} - \text{сопротивление эмиттерного } p\text{-}n\text{-перехода (входное со-}$$

противление транзистора - h_{11}).

Сопротивление $R1$ подбирается из условия $I_{\text{б0}} > U_{\text{max}} / h_{11}$. Отсюда:

$$R1 \leq \frac{E_{\text{к}} - U_{\text{max}}}{U_{\text{max}}} \cdot h_{11} \text{ или, если считать, что } U_{\text{max}} \ll E_{\text{к}}, \text{ то } R1 \approx \frac{E_{\text{к}}}{U_{\text{max}}} \cdot h_{11}.$$

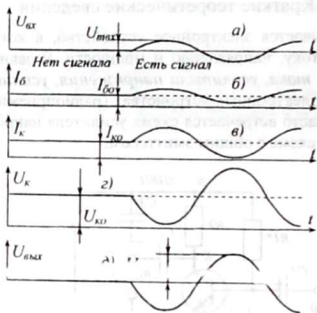


Рис. 2

При отсутствии входного сигнала в цепи базы протекает только постоянный ток $I_{\text{б0}}$. Вследствие этого через транзистор протекает постоянный коллекторный ток $I_{\text{к0}}$ и на коллекторе сохраняется постоянное напряжение $U_{\text{к0}} = E_{\text{к}} - I_{\text{к0}} \cdot R2$. Выходное напряжение усилителя $U_{\text{вых}}$ равно нулю, так как постоянное напряжение $U_{\text{к0}}$ через конденсатор $C2$ не передается. Это соответствует режиму отсутствия сигнала, то есть, левой части рисунка 2.

При подаче на вход усилителя переменного напряжения $u_{\text{вх}}$ напряжение базы, складываясь из двух напряжений $U_{\text{б0}}$ и $u_{\text{вх}}$, начинает изменяться и базовый ток при этом то возрастает, то уменьшается (рис. 2, б). Соответственно изменяется и коллекторный ток, который на резисторе $R2$ создает одновременно и постоянное напряжение $U_{\text{к0}}$ и переменное $u_{\text{к}}$, которое является выходным напряжением усилителя. Переменное напряжение $u_{\text{к}}$ через конденсатор $C2$ передается на выходные зажимы усилителя.

Обратите внимание: Хотя переменное выходное напряжение создается на резисторе $R2$, между точками K и N (см. рис. 1), однако ввиду того, что верх-

няя шина схемы (шина высокого потенциала - ШВП) всегда «заземлена» по переменному току, то есть, через конденсатор большой ёмкости $C3$ соединена с массой (с шиной нулевого потенциала - ШНП), безразлично, где снимается переменное выходное напряжение: между точками K и N или между точками K и M . Второй вариант более удобен, так как точка N имеет высокое постоянное напряжение $-E_k$, поэтому на практике в схемах ОЭ (с общим эмиттером) **выходным напряжением усилительного каскада считают переменное напряжение между коллектором и шиной нулевого потенциала** (массой).

Данная схема наиболее простая и поэтому называется *простейшим усилительным каскадом*. Однако у простейшего усилительного каскада имеется существенный недостаток - это температурная нестабильность. Дело в том, что с повышением температуры возрастает число неосновных носителей заряда. При этом возрастает обратный ток через закрытый коллекторный $p-n$ -переход ($I_{КБО}$). Это приводит к возрастанию базового тока, а тот, в свою очередь, - к возрастанию неуправляемого коллекторного тока.

Возрастание коллекторного тока вызывает нагрев транзистора и еще большее увеличение тока базы и коллектора. Короче говоря, электрический режим работы транзистора становится неустойчивым и при некоторых условиях транзистор может даже выйти из строя (сгореть).

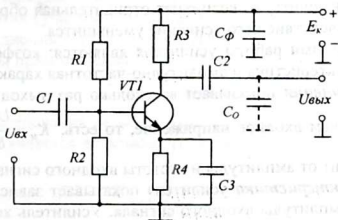


Рис. 3

Стабилизация режима работы транзистора в усилителях достигается путем некоторого усложнения схемы с использованием делителя напряжения $R1R2$ и цепочки термостабилизации $R4C3$ (рис. 3). Если в простейшем усилителе первоначально устанавливается начальный ток базы $I_{б0}$, то в схеме с термостабилизацией устанавливается начальное напряжение базы $U_{б0}$ с помощью делителя напряжения $R1R2$.

Через этот делитель течет постоянный ток I_0 по цепи: $+E_k - ШВП - R1 - R2 - ШНП - -E_k$, и создает на базе транзистора напряжение $U_{б0} = \frac{R2}{R1 + R2} \cdot E_k$.

Сопротивления резисторов делителя $R1$ и $R2$ подбирают таким образом, чтобы напряжение $U_{б0}$, создаваемое делителем, было практически постоянным.

Это достигается при условии, если ток через делитель во много раз превышает базовый ток транзистора ($I_0 \gg I_{\beta 0}$), по крайней мере, на порядок.

При наличии постоянного тока базы $I_{\beta 0}$ постоянный коллекторный ток $I_{\kappa 0}$ протекает по цепи: $+E_k - ШВП - R3 -$ коллектор - эмиттер - $R4 - ШНП - -E_k$ и на резисторе $R4$ по закону Ома создает падение напряжения $U_{\varepsilon 0} = I_{\kappa 0} \cdot R4$.

Таким образом, начальное напряжение между базой и эмиттером определяется разностью потенциалов базы и эмиттера, то есть, $U_{\beta \varepsilon 0} = U_{\beta 0} - U_{\varepsilon 0}$. Потенциалы $U_{\beta 0}$ и $U_{\varepsilon 0}$ отсчитываются относительно шины нулевого потенциала (массы).

В процессе работы усилителя с ростом коллекторного тока (вызванным, например, увеличением температуры) возрастает падение напряжения на резисторе $R4$, то есть, потенциал эмиттера U_{ε} возрастает. При этом напряжение между базой и эмиттером $U_{\beta \varepsilon}$ уменьшается, так как $U_{\beta \varepsilon} = U_{\beta} - U_{\varepsilon}$. Это вызывает уменьшение тока базы I_{β} и, соответственно, уменьшение коллекторного тока I_{κ} . Конденсатор $C3$, большой ёмкости, не представляет значительного сопротивления переменному току I_{κ} , и поэтому говорят, что в усилителе применяется отрицательная обратная связь по постоянному току, так как в процессе усиления сигнала напряжение на резисторе $R4$ не изменяется. Однако, если конденсатор $C3$ отключить, то возникнет отрицательная обратная связь и по переменному току, вследствие чего усиление уменьшится.

Основными показателями работы усилителя являются: коэффициент усиления, амплитудная характеристика и амплитудно-частотная характеристика.

Коэффициент усиления показывает во сколько раз выходное напряжение усилителя больше, чем входное напряжение, то есть, $K_u = \frac{U_{m_{\text{вых}}}}{U_{m_{\text{вх}}}}$ Коэффициент усиления зависит от амплитуды и частоты входного сигнала.

Амплитудная характеристика усилителя показывает зависимость коэффициента усиления от амплитуды входного сигнала. Усилитель хорошо усиливает слабые сигналы вплоть до некоторого значения, начиная с которого выходной сигнал начинает искажаться (рис. 4, а, б, в).

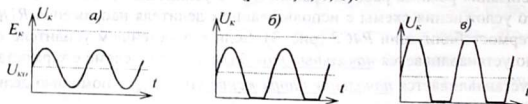


Рис. 4

Как видно из рисунка, искажение усиленного сигнала объясняется отсечкой вершин полуволн напряжения на уровнях $U_k = E_k$ и $U_k = 0$. Дальнейший рост амплитуды входного напряжения не вызывает увеличения амплитуды выходного напряжения и коэффициент усиления уменьшается.

Амплитудная характеристика усилителя как зависимость $K = f(U_{max})$ представлена на рисунке 5. Участок I соответствует режиму линейного усиления $K = const$. При этом сигнал усиливается без искажений. Участок III соответствует отсутствию усиления $K = 0$. Участок II – режиму нелинейного усиления, то есть, усиления сигналов с искажениями.

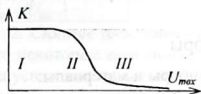


Рис. 5

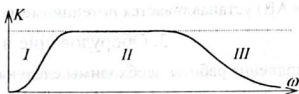


Рис. 6

Амплитудно-частотная характеристика усилителя показывает зависимость коэффициента усиления от частоты (рис. 6). На низших частотах (0...100 Гц) на прохождение сигнала основное влияние оказывает ёмкостное сопротивление разделительных конденсаторов $C1$ и $C2$. (участок I) Вследствие их большого сопротивления на низких частотах выходное напряжение, а следовательно и коэффициент усиления уменьшаются. На высших частотах (участок III) уменьшение усиления связано с шунтирующим действием паразитной ёмкости монтажа C_0 , показанной на рис. 3 пунктиром. Часть усиленного переменного тока через нее стекает бесполезно на массу и не попадает на выход. На средних частотах (участок II) влиянием ёмкостей $C1$, $C2$ и C_0 можно пренебречь, амплитудно-частотная характеристика совпадает с АЧХ идеального усилителя, то есть, прямолинейна.

2. Схема исследования

Схема исследования резисторного усилителя приведена на рис. 7. Особенностью схемы является возможность проверки влияния сопротивления коллек-

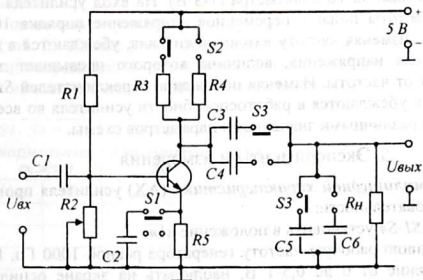


Рис. 7

торной нагрузки R_n , ёмкости разделительного конденсатора C_p , паразитной ёмкости C_0 и отрицательной обратной связи по току на амплитудно-частотную

характеристику усилителя. Для этой цели в схеме предусмотрены переключатели $S1...S4$, с помощью которых можно отдельно изменять величины R_k , C_p , C_o и включать обратную связь. Оптимальный режим работы усилителя обеспечивается при установке всех переключателей в состояние «1». На рисунке 7 все переключатели установлены в положение «1». Режим усиления (в классе А или АВ) устанавливается потенциометром $R2$.

3. Оборудование и приборы

Для выполнения работы необходимы следующие приборы и материалы:

1. Макет резисторного усилителя.
2. Генератор звуковой частоты ГЗ-18, ЗГ-2 или ГЗШ-2.
3. Электронный вольтметр ВЗ-38 или ВЗ-18.
4. Осциллограф ОДШ-1.
5. Источник питания ИЭПП-1.
6. Соединительные проводники.

4. Сборка и опробование схемы

Лабораторную установку с макетом и измерительными приборами собирают по следующей схеме (рис. 8).

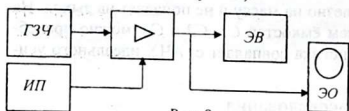


Рис. 8

После проверки преподавателем приступают к опробованию схемы. Переключатели $S1-S4$ устанавливают в положение «1» (верхнее или левое положение рожка тумблера). Включив приборы, дают им прогреться в течение

1-2 минут. Затем устанавливают рабочее напряжение питания $E_k = 5$ В и пределы измерения лампового вольтметра (1-3 В). На вход усилителя от генератора звуковой частоты подают переменное напряжение порядка 10-20 мВ (0,01-0,02 В). Бегло изменяя частоту входного сигнала, убеждаются в наличии на выходе усилителя напряжения, величина которого превышает значение входного и зависит от частоты. Изменяя положение переключателей $S1-S4$ (каждый раз у одного), убеждаются в работоспособности усилителя во всех режимах, определяемых различными значениями параметров схемы.

5. Эксперименты и измерения

1. Снятие амплитудной характеристики (АХ) усилителя проводить в следующей последовательности:

- 1) Переключатели $S1-S4$ установить в положение «1».
- 2) Установить среднюю рабочую частоту генератора равной 1000 Гц. Изменяя входное напряжение от 0 до 0,5-1 В, наблюдать на экране осциллографа форму неискаженного выходного сигнала. Полученные изображения зарисовать в тетрадь.

3) Отмечая по вольтметру значения входного и выходного напряжения, заполнить таблицу 1.

Таблица 1

$U_{вх}, В$	0,005	0,010	0,015	0,020	0,025	...	0,500
$U_{вых}, В$							
$K=U_{вых}/U_{вх}$							

2. Снятие амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) усилителя имеет некоторые особенности. Во первых, амплитудно-частотная характеристика усилителя показывает зависимость его коэффициента усиления от частоты входного сигнала $K = K(f)$. Однако очень часто ее заменяют зависимостью выходного напряжения от частоты при неизменной амплитуде входного сигнала, то есть, $U_{вых} = U(f)$ при $U_{вх} = const$.

Во-вторых, при построении графика этой зависимости берут во внимание тот факт, что органы чувств человека имеют логарифмическую чувствительность, то есть, человек различает изменение сигнала не на сколько вольт, а во сколько раз! Поэтому в логарифмической шкале вдоль осей откладывают отрезки, соответствующие логарифмам величин (рис. 9, а).

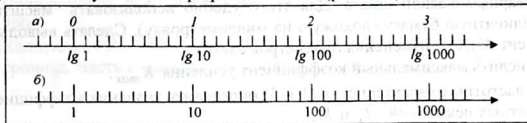


Рис. 9

Если взять логарифмы чисел 100 и 1000 ($lg100 = 2$, $lg1000 = 3$), то между ними можно найти девять чисел, логарифмы которых будут равны 2,1, 2,2, 2,3, 2,4, 2,5, 2,6, 2,7, 2,8, 2,9. В такой же пропорции делит отрезок между 1 и 1000.

Для снятия амплитудно-частотной характеристики усилителя необходимо заполнить таблицу 2 (таб. 2). Каждый из 5 столбцов таблицы заполняется данными, полученными при определенных положениях переключателей $S1, S2, S3, S4$ соответствующих изменению исследуемого элемента схемы.

Таб. 2

Частота $f, Гц$	$S1 - S4 = \langle 1 \rangle$ нормальный режим		$S2 = \langle 2 \rangle$ Уменьшение R_K		$S3 = \langle 2 \rangle$ Уменьшение C_p		$S4 = \langle 2 \rangle$ Увеличение C_o		$S1 = \langle 2 \rangle$ отрицательная обратная связь	
	$U_{вых}$	K	$U_{вых}$	K	$U_{вых}$	K	$U_{вых}$	K	$U_{вых}$	K
20										
40										
...										
20000										

Измерения производятся на частотах 20, 25, 31, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3150, 4000,

5000, 6300, 8000, 10000, 12500, 16000, 20000 Гц, но можно ограничиться только подчеркнутыми.

Для удобства подсчета коэффициента усиления K_n входное напряжение следует брать таким, чтобы обойтись без сложных вычислений. Например, можно взять $U_{вх} = 0,01$ В, 0,02 В и т. д. При установке величины входного напряжения следить, чтобы не выйти за пределы линейной части амплитудной характеристики. В противном случае нарушение усиления будет связано с нелинейным режимом работы транзистора и будет невозможно объективно судить о роли исследуемых элементов схемы усилителя.

6. Обработка результатов измерений

1. По данным таблицы 1 построить амплитудные характеристики $U_{вых} = f(U_{вх})$ и $K = f(U_{вх})$. Объяснить полученные результаты. Определить максимально допустимое значение входного напряжения, при котором усиление происходит без искажений.
2. По данным таблицы 2 построить АЧХ для всех пяти случаев на одном графике. Необходимо, чтобы на графике значения частоты f были отложены в логарифмической шкале. Для этого удобно использовать масштабную координатную бумагу (похожую на миллиметровку). Сделать выводы, как зависит АЧХ от изменения параметров схемы.
3. Вычислить максимальный коэффициент усиления K_{max} .
4. Для частотных характеристик (1 и 5) определить значения коэффициентов частотных искажений M_n и M_a .

$$M_n = \frac{K_n}{K_{ср}}, \quad M_a = \frac{K_a}{K_{ср}},$$

где K_n - усиление на нижней частоте $f_n = 20$ Гц.

$K_{ср}$ - усиление на средней частоте $f_{ср} = 1000$ Гц,

K_a - усиление на высшей частоте $f_a = 20$ кГц.

5. Сделать заключение о роли отрицательной обратной связи в усилителе.

7. Указания к отчету

В отчете должны быть представлены:

1. Принципиальная схема исследуемого усилителя с указанием номиналов всех его элементов.
2. Таблицы измерений – табл. 1, 2
3. Амплитудные характеристики $U_{вых} = f(U_{вх})$ и $K = f(U_{вх})$ с соответствующими выводами.
4. Частотные характеристики (1-5), выполненные совместно и соответствующие разъяснения по ним.
5. Коэффициенты частотных искажений при отсутствии и наличии отрицательной обратной связи, и соответствующие выводы.
6. Ответы на контрольные вопросы.

8. Вопросы для подготовки

1. Что такое усилитель? Что такое коэффициент усиления?
2. Каковы основные элементы схемы усилителя и их назначение?
3. Что такое «термостабилизация» работы усилителя?
4. Что представляет собой амплитудная характеристика усилителя?
5. Отчего возникают амплитудные искажения?
6. Что представляет собой амплитудно-частотная характеристика усилителя?
7. В чем отличие АЧХ резисторного усилителя от АЧХ идеального усилителя?
8. Как влияют на частотную характеристику усилителя величины емкостей разделительного конденсатора C_p и паразитной емкости C_o ?
9. Что такое обратная связь? Перечислите ее виды и особенности.
10. Как влияет отрицательная обратная связь на качество усиления?

9. Литература

1. Гершензон Е. М. Радиотехника / Учебное пособие для педвузов - М.: Просвещение, 1986, с. 139-146.
2. Прянишников В.А. Электроника: Курс лекций – СПб: Корона принт, 2000.
3. Халиуллин Р.Н. Лабораторный практикум по радиотехнике и радиоэлектронике. Часть I. Электронные приборы и усилители. Ош, 1991.

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСНОГО УСИЛИТЕЛЯ

1. Изучение принципа работы и схемы резонансного усилителя.
2. Определение основных показателей работы резонансного усилителя высокой частоты.

Цель

работы:

Содержание

работы:

1. Снятие и анализ амплитудно-частотной характеристики резонансного усилителя.

1. Краткие теоретические сведения

Усилители высокой частоты редко строят широкополосными, как правило, это избирательные (селективные) и полосовые усилители. Характерным признаком их является наличие колебательных контуров, фильтров на основе одиночных и связанных контуров и др.

Избирательность усилителя обеспечивается применением фильтров, прозрачных или непрозрачных для определенного интервала или спектра частот. Не существует фильтров, способных пропускать только одну единственную частоту, поэтому каждый фильтр характеризуется полосой пропускания $2\Delta f$, то есть, шириной интервала частот, в пределах которого фильтр пропускает сигналы без заметного ослабления. Для идеального фильтра $2\Delta f = f_2 - f_1$ (рис. 1, а).

Резонансные характеристики реальных фильтров отличаются от резонансных характеристик идеальных фильтров прямоугольной, чаще колоколообразной формой (рис. 1, б).

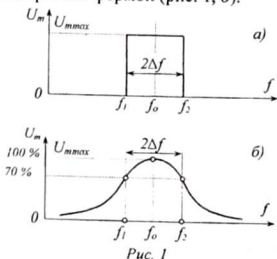


Рис. 1

Полоса пропускания реального фильтра определяется как интервал частот, в пределах которого *мощность сигнала* (звука, света и т.п.) изменяется *не более, чем в 2 раза*. Такое изменение мощности электрического сигнала достигается при условии, если ток или напряжение изменяется не более, чем в $\sqrt{2}$ раз, то есть, частота среза определяется из условия $U_{\text{срез}} = \frac{U_{\text{max}}}{\sqrt{2}}$ (вспомните

формулу мощности: $P = I^2 \cdot R$ или

$P = \frac{U^2}{R}$). Если максимальное значение тока или напряжения принять за 100%,

то сигнал при токе или напряжении не ниже, чем $\frac{U_{\text{max}}}{\sqrt{2}} \approx 0,7 U_{\text{max}}$ ($\approx 70\% U_{\text{max}}$)

считается неизменившимся. Следовательно, если провести горизонтальную прямую на уровне 0,7 максимального значения тока или напряжения, она пересечет резонансную кривую в двух точках, которым соответствуют частоты сре-

за f_1 и f_2 (рис. 1, б). Полоса пропускания фильтра равна разности этих частот: $2\Delta f = f_2 - f_1$.

Полоса пропускания одиночного контура зависит от его добротности - Q . Чем выше добротность контура, тем уже и острее резонансная характеристика (рис. 2). Существует аналитическая зависимость, позволяющая вычислить полосу пропускания одиночного контура: $2\Delta f = \frac{f_0}{Q}$, где f_0 - частота собственных (свободных) колебаний контура, Q - добротность контура.

Добротность контура показывает, во сколько раз волновое сопротивление контура больше приведенного активного сопротивления потерь в контуре - R , то есть, $Q = \frac{\rho}{R}$, где $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$ или $\rho = \omega_0 L$ или $\rho = \frac{1}{\omega_0 C}$.

Повышение добротности контура достигается за счет уменьшения сопротивления потерь R , например, можно использовать серебряные или золотые проводники, хороший диэлектрик и т. д.

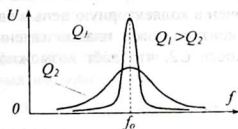


Рис. 2

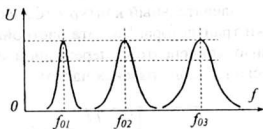


Рис. 3

Обратите внимание: один и тот же контур при настройке на разные частоты имеет неодинаковую полосу пропускания (рис. 3). Действительно, чем выше частота ($2\Delta f = \frac{f_0}{Q}$).

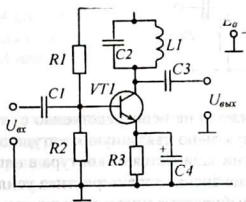


Рис. 4

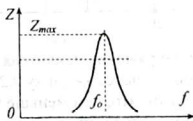


Рис. 5

Резонансный усилитель представляет собой обыкновенный усилитель, в котором в качестве нагрузки в коллекторную цепь включен колебательный контур (рис. 4). Вспомните, что выходное напряжение усилителя создается коллекторным током, протекающим через нагрузку ($U_{\text{вых}} = i_k \cdot Z$), и поэтому величина выходного напряжения зависит от сопротивления нагрузки, то есть, полного сопротивления контура - Z . В данной схеме используется, параллель-

ный колебательный контур $LIC2$, у которого сопротивление максимально на частоте резонанса.

Особенность работы этого усилителя состоит в том, что полное сопротивление контура зависит от частоты усиливаемого сигнала (рис. 5). Максимальное сопротивление контура $Z_{\text{макс}} = Q^2 R$, достигается при условии совпадения частоты сигнала с собственной частотой контура (параллельный резонанс). На всех остальных частотах сопротивление контура намного меньше, чем при резонансной частоте. Поэтому усиление на этой частоте максимально и амплитудно-частотная характеристика усилителя при этом имеет колоколообразную форму.

Резонансные усилители применяются в радиоприемных устройствах для преимущественного усиления сигнала одной станции при одновременном подавлении (неусилении) сигналов остальных станций.

2. Схема исследования

Принципиальная схема для исследования резонансного усилителя приведена на рис. 6. Колебательный контур $LIC2$ включен в коллекторную цепь в качестве нагрузки транзистора. Частота настройки контура может плавно изменяться с помощью конденсатора переменной емкости $C2$, что даёт возможность работы в нескольких диапазонах частот.

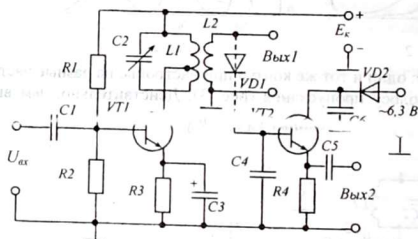


Рис. 6

Выходное напряжение усилителя снимается не непосредственно с коллектора транзистора, а через катушку $L2$, индуктивно связанную с катушкой контура $L1$. Дело в том, что, чем меньше энергии забирается из контура в нагрузку, тем выше добротность контура и острее резонансная характеристика усилителя. С этой целью число витков катушки $L2$ выбирается много меньше, чем в катушке $L1$. А поскольку из контура забирается незначительная мощность, её недостаточно для поворота стрелки электроизмерительного прибора. Поэтому для измерения выходного напряжения резонансного усилителя необходимо использовать электронный вольтметр с высоким входным сопротивлением.

На вход усилителя от генератора высокой частоты подается высокочастотное переменное напряжение неизменной амплитуды. При условии постоянства частоты входного сигнала на выходе усилителя устанавливается переменное

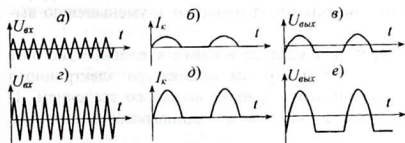
напряжение также постоянной амплитуды. Изменение частоты приводит к изменению амплитуды выходного сигнала, который регистрируется электронным вольтметром, подключаемым к выходу.

Примечание. Электронный вольтметр переменного напряжения ВЗ-18, используемый в работе, не рассчитан на частоту выше 1 МГц. Поэтому в установке используется преобразование выходного сигнала. При этом выходное напряжение усилителя с частотой от 5 до 50 МГц, преобразуется в импульсное низкочастотное напряжение, с частотой 50 Гц. Обратите внимание, что схема преобразователя на транзисторе $VT2$ (рис. 6) питается не постоянным, а переменным напряжением 6,3 В частотой 50 Гц.

Особенность преобразования заключается в том, что транзистор $VT2$ открыт только тогда, когда и на базу и на коллектор одновременно подаются положительные напряжения. Дiode $VD1$ вместе с резистором $R4$ и конденсатором $C4$ образуют диодный детектор. Но так как входной сигнал детектора не модулирован, то на сглаживающем конденсатора $C4$ будет устанавливаться постоянное напряжение, пропорциональное амплитуде колебаний. Таким образом, чем сильнее выходной сигнал усилителя, тем больше положительное напряжение на базе транзистора $VT2$ и тем больше коллекторный ток транзистора.

Диод $VD2$ обеспечивает подачу между коллектором и эмиттером положительных импульсов напряжения с частотой 50 Гц. Прохождение этих импульсов через транзистор будет зависеть от напряжения на его базе. Таким образом, чем сильнее сигнал на входе преобразователя, тем больше амплитуда полуволн коллекторного тока и наоборот (рис. 7). На резисторе $R4$ создается переменное напряжение с частотой 50 Гц, которое может быть подано в любой низкочастотный электронный вольтметр ВЗ-18, ВЗ-38, МВЛ-2М или др.

Рис. 7



На резисторе $R4$ создается переменное напряжение с частотой 50 Гц, которое может быть подано в любой низкочастотный электронный вольтметр ВЗ-18, ВЗ-38, МВЛ-2М или др.

3. Оборудование и приборы

1. Макет резонансного усилителя с преобразователем частоты.
2. Генератор радиочастоты ГЗ-104.
3. Электронный вольтметр ВЗ-18 или ВЗ-38.
4. Источник питания ИЭПП-1 или ИПД-1.
5. Соединительные провода, в том числе экранированный двухжильный провод для подключения высокочастотного генератора к схеме.

4. Сборка и опробование схемы

Схему исследования резонансного усилителя собирают в соответствии с рис. 8. Выход генератора радиочастоты соединяется с входом усилителя с помощью экранированного провода, чтобы исключить высокочастотные помехи.

Обратите внимание, что от источника питания на усилитель одновременно

подаются два напряжения: постоянное и переменное.

После проверки монтажа схему следует опробовать. Включают источник питания усилителя и электронный вольтметр. Затем включают генератор, и устанавливают выходное напряжение в пределах 10-100 мВ. Настройку усилителя

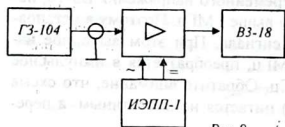


Рис. 8

на частоту усиливаемого сигнала можно произвести двумя способами: изменяя емкость переменного конденсатора контура усилителя при неизменной частоте генератора, либо изменяя частоту генератора при фиксированной настройке контура. Признаком резонанса является мак-

симальное напряжение на контуре, отмечаемое электронным вольтметром. Изменяя частоту генератора, уточняют рабочий диапазон частот усилителя, в котором вольтметр дает показания.

5. Эксперименты и измерения

1. Установив ротор переменного конденсатора в среднее положение, подают на вход усилителя напряжение от генератора. Изменяя частоту генератора, отыскивают частоту, на которой стрелка вольтметра дает отклонения. Медленно изменяя частоту генератора, добиваются максимального отклонения стрелки вольтметра. Это и есть резонансная частота. Любое отклонение частоты генератора от резонансной частоты контура усилителя приводит к уменьшению выходного напряжения усилителя.

2. Не изменяя настройку генератора и контура усилителя, плавно изменяют выходное напряжение генератора, чтобы стрелка индикатора электронного вольтметра установилась у крайнего правого деления шкалы со значением 1, 10 или 100. Частоту, соответствующую максимуму, записывают в середине первой строки таблицы 1.

Таблица 1

$\frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вых max}}}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
$C = C_{\text{ср}}$																			
$C = C_{\text{min}}$																			
$C = C_{\text{max}}$																			

3. Плавно увеличивая частоту генератора, отмечают частоты, при которых выходное напряжение усилителя принимает значения: 0,9; 0,8; 0,7;...;0,2; 0,1 максимального. Соответствующие частоты записывают в первой строке таблицы (правее середины).

4. Возвращают частоту генератора к частоте резонанса и, продолжая дальше уменьшать ее, отмечают частоты, при которых значения выходного напряжения вновь равны: 0,9; 0,8; 0,7;...;0,2; 0,1 максимального. Соответствующие частоты записываются в левой части первой строки таблицы (справа налево).

5. Аналогичные измерения провести для случаев с максимальной и минимальной емкостью контура усилителя. Результаты соответственно занести во вторую и третью строку таблицы.

6. Обработка результатов исследования

1. По данным таблицы I построить резонансные характеристики усилителя по аналогии с рис. 3 для трех значений настройки контура (цену делений принять 0,02 МГц на одну клетку в тетради).

2. По построенным резонансным характеристикам вычислить полосу пропускания усилителя для трех случаев. Для этого провести горизонтальную прямую линию на уровне 0,7 максимума. Полоса пропускания находится как разность частот, соответствующих точкам пересечения этой прямой с резонансной кривой. Объясните, почему в трех случаях полоса пропускания получилась неодинаковой?

3. На основе формулы $2\Delta f = \frac{f_0}{Q}$ подсчитайте добротность контура. Найдите ее среднее значение. Ответьте, как изменится полоса пропускания контура, если увеличить (или уменьшить) частоту настройки в 10 раз?

7. Указания к отчету

Отчет должен содержать следующие материалы:

1. Наименование и цель работы.
2. Схему резонансного усилителя.
3. Таблицу измерений.
4. Резонансные характеристики для трех разных частот контура.
5. Расчеты и численные значения полосы пропускания, добротности контура, коэффициента усиления.
6. Выводы об изменении полосы пропускания контура $2\Delta f$ при изменении частоты настройки.
7. Ответы на контрольные вопросы.

8. Вопросы для подготовки

1. В чем отличие резонансного усилителя от других усилителей?
2. От чего зависит острота резонансной кривой?
3. Что нужно, чтобы повысить избирательность усилителя?
4. Как зависит полоса пропускания контура от частоты настройки?
5. Где используется резонансный усилитель?

9. Литература

1. Гершензон Е.М. и др. Радиотехника / Учеб. пособие для педвузов - М.: Просвещение, 1986, с 146-149.
2. Халиуллин Р.Н. Лабораторный практикум по радиотехнике и радиоэлектронике. Часть 1. Электронные приборы и усилители. Ош, 1995.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛОСОВОГО УСИЛИТЕЛЯ

1. Ознакомиться со схемой, устройством и работой полосового усилителя.
2. Научиться настраивать фильтры и снимать частотную характеристику усилителя.
3. Научиться вычислять коэффициент прямоугольности и ширину полосы пропускания

Цель работы:

Содержание работы:

1. Исследование влияния глубины связи между контурами на частотные характеристики полосового усилителя.

1. Краткие теоретические сведения

Полосовым усилителем называется усилитель, равномерно и хорошо усиливающий электрические сигналы в определенном интервале частот, называемом **полосой пропускания**. Полоса пропускания $2\Delta f = f_2 - f_1$, где $f_2 = f_0 + \Delta f$, $f_1 = f_0 - \Delta f$, а f_0 - частота настройки фильтра (рис. 1, а).

Одним из распространенных полосовых усилителей является усилитель промежуточной частоты, широко используемый в супергетеродинных схемах радиоприемников, телевизоров и т.п.

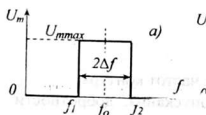


Рис. 1

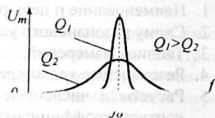
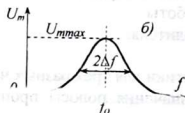


Рис. 2

Обеспечение хорошей избирательности и неискаженного воспроизведения сигналов звука или изображения достигается формированием амплитудно-частотной характеристики усилителя, близкой к идеальной прямоугольной форме (рис. 1, а). Идеальный полосовой усилитель пропускает и обеспечивает одинаковое усиление сигналов в пределах полосы частот шириной $2\Delta f$. Резонансная характеристика реального фильтра с одним контуром (рис. 1, б) не удовлетворяет условиям хорошей избирательности достаточной полосы пропускания, поскольку оба этих требования в корне противоречивы. Дело в том, что полоса пропускания

одиночного контура $2\Delta f = \frac{f_0}{Q}$ зависит от его доб-

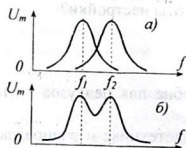


Рис. 3

ротности (качества). С увеличением добротности контура повышается избирательность; но сужается полоса пропускания и, наоборот, с уменьшением добротности полоса пропускания расширяется, но избирательность ухудшается (рис. 2).

Запомните: Избирательность усилителя характеризуется крутыми склонами частотной характеристики, поэтому на практике повышение избирательности связано со стремлением к получению резонансной характеристики, близкой к прямоугольной. Это достигается применением фильтров, состоящих из двух, трех и более контуров.

Наиболее простое решение возможно при использовании в многокаскадном усилителе одиночных колебательных контуров-фильтров, настроенных на разные частоты (рис. 3, а). Каждый каскад вносит свой вклад в общее усиление и формирование частотной характеристики усилителя в целом (рис. 3, б). Провал в середине характеристики усилителя с двумя контурами можно устранить третьим, настроенным на среднюю частоту, и так далее. Наилучшие результаты дают фильтры на основе связанных контуров.

Связанными контурами называются контуры, которые могут обмениваться друг с другом энергией через элемент связи.

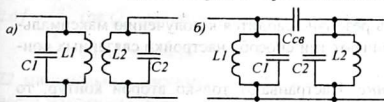


Рис. 4

В качестве элемента связи служат взаимные электрические и магнитные поля (рис. 4).

Поскольку обмен энергией происходит взаимно, то энергию, переданную из одного контура в другой, можно считать безвозвратно потерянной на некотором, **вносимом** из второго контура, **сопротивлении** $R_{вн}$. Величина вносимого сопротивления зависит от коэффициента связи и полных сопротивлений контуров.

Коэффициент связи показывает, во сколько раз реактивное сопротивление элемента связи больше, чем средняя геометрическая реактивных сопротивлений контуров, имеющих тот же характер, что и элемент связи

$$X_{св} \quad (1)$$

Сопротивление ΔZ_1 , вносимое ...
 имеет комплексный характер и состоит из активной и реактивной составляющих: $\Delta Z_1 = \Delta R_1 + j\Delta X_1$. Здесь ΔR_1 - активная часть вносимого сопротивления, учитывающая потери энергии во втором контуре,

$$\Delta R_1 = \frac{X_{св}^2}{(Z_2)^2} \cdot R_2 \quad (2),$$

где Z_2 - полное сопротивление второго контура, R_2 - его активное сопротивление.

ΔX_1 - реактивная часть вносимого сопротивления, вызывающая расстройку контуров (несовпадение собственных частот),

$$\Delta X_1 = -\frac{X_{св}^2}{(Z_2)^2} \cdot X_2 \quad (3),$$

где X_2 - реактивное сопротивление второго контура.

Знак «минус» означает, что из второго контура реактивное сопротивление вносится в первый контур с характером, противоположным характеру сопротивления Z_2 на данной частоте. Например, если сопротивление второго контура индуктивно, в первый контур вносится емкостное сопротивление и наоборот. Сопротивление Z_2 зависит от частоты и может принимать активный, индуктивный или емкостный характер

$$Z_2 = R_2 + j(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}).$$

Аналогичные сопротивления вносятся из первого контура во второй:

$$\Delta R_2 = \frac{X_{св}^2}{(Z_1)^2} \cdot R_1; \quad \Delta X_2 = -\frac{X_{св}^2}{(Z_1)^2} \cdot X_1.$$

Вносимые сопротивления зависят от расстройки контуров и величины связи между ними.

Задача настройки контуров в резонанс сводится к получению максимального тока во втором контуре. Различают три способа настройки связанных контуров в резонанс:

I. Первый частичный резонанс. Настраивают только второй контур, то есть, изменяют его собственную частоту до тех пор, пока реактивное сопротивление, вносимое из второго контура в первый, не компенсирует реактивную часть полного сопротивления первого контура. При этом сопротивление первого контура становится минимальным $Z_1 = Z_{1min} = R_1$, ток I_1 возрастает и одновременно возрастает ток I_2 .

II. Второй частичный резонанс. Настраивают только первый контур, не меняя настройки второго контура. Добиваются компенсации реактивной составляющей сопротивления X_2 . При этом полное сопротивление второго контура становится активным и принимает минимальное значение $Z_2 = R_2$, в связи с этим возрастает ток I_2 , так как уменьшается вносимое сопротивление.

III. Полный резонанс. Настройка производится в два этапа. Вначале удаляют или размыкают второй контур и настраивают первый контур на частоту генератора. При этом сопротивление первого контура активно: $Z_1 = R_1$ и ток I_1 максимален. После этого восстанавливают второй контур и, настраивая его, добиваются максимального тока I_2 . При этом оба контура вносят друг в друга только активные сопротивления и токи в обоих контурах максимальны.

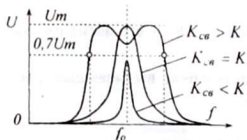


Рис. 5

Известно, что любой генератор передает в нагрузку наибольшую мощность при условии равенства сопротивления нагрузки и внутреннего сопротивления генератора. В нашем случае внутренним сопротивлением генератора является активное сопротивление первого контура R_1 , а сопротивлением нагрузки - вносимое из второго контура сопротивление ΔR_1 . Поэтому

максимальная мощность будет передана во второй контур при условии:

$$\Delta R_1 = R_1 \text{ и } \Delta R_2 = R_2 .$$

Связь между контурами, при которой выполняется данное равенство, называется критической - $K_{кр}$. При $\Delta R_1 < R_1$ связь считается слабой, а при $\Delta R_1 > R_1$ - сильной.

Наибольшее распространение на практике получили связанные контуры, состоящие из двух совершенно одинаковых контуров, настроенных в полный резонанс. Изменение полосы пропускания связанных контуров достигается изменением величины связи между контурами. При слабой связи ($K_{св} < K_{кр}$) вносимые сопротивления невелики и полоса пропускания связанных контуров получается очень узкой (рис. 5).

При критической связи ($K_{св} = K_{кр}$) система из двух связанных одинаковых контуров ведет себя как одиночный контур и ее полоса пропускания равна $2\Delta f = \frac{f_0}{Q}$, где Q - добротность одного контура.

При сильной связи ($K_{св} > K_{кр}$), при условии $\omega = \omega_0$, сопротивления Z_1 и Z_2 минимальны, вносимые сопротивления возрастают (см. формулу 2) и на месте максимума образуется впадина. Зато на двух других частотах ($\omega < \omega_0$ и $\omega > \omega_0$) имеет место максимум. Это связано с тем, что вносимое в один контур сопротивление зависит не только от величины связи, но и от полного сопротивления другого контура (см. формулы 2, 3), при $\omega \neq \omega_0$ значения Z_1 и Z_2 возрастают и вносимые сопротивления уменьшаются. Наиболее широкую и наиболее близкую к прямоугольной, форму резонансная характеристика связанных контуров имеет при условии, если впадина не опускается ниже уровня 0,7 максимального значения, то есть, $0,7U_m$ (рис. 6).

Степень совершенства формы частотной характеристики полосового фильтра оценивается коэффициентом прямоугольности Π . Коэффициент прямоугольности есть отношение расстройки, при которой напряжение на втором контуре фильтра составляет 0,7 максимального ($2\Delta f_{0,7}$) к ширине полосы пропускания ($2\Delta f_{0,1}$), измеряемой на уровне 0,1 максимального.

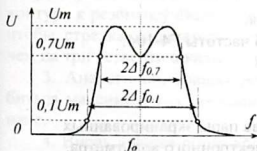


Рис. 6

$$\Pi = \frac{2\Delta f_{0,7}}{2\Delta f_{0,1}}$$

Для идеального фильтра, этот коэффициент равен 1, для реального он всегда меньше единицы.

В данной работе предлагается на базе действующей схемы усилителя промежуточной частоты ознакомиться с работой полосового усилителя.

2. Схема исследования

Схема полосового усилителя с фильтром из двух связанных контуров

представлена на рис 7. Особенностью фильтра является возможность изменения глубины связи путем перемещения второго контура относительно первого. С этой целью предусмотрены три пары гнезд, к которым подключается второй контур для получения слабой или сильной связи. Каждый контур может настраиваться на нужную частоту с помощью подстроенного конденсатора.

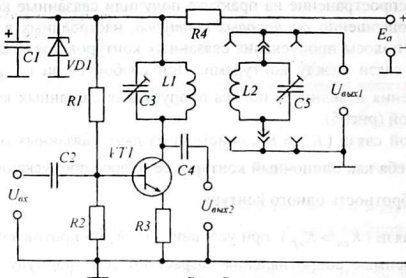


Рис. 7

Схема, имеет два выхода: «Выход 1» – основной, дает возможность контролировать напряжение, а соответственно и ток во втором контуре; «Выход 2» – вспомогательный, служит только для контроля настройки первого контура на начальной стадии настройки обоих контуров в полный резонанс.

Схема питается стабилизированным напряжением, для чего включен стабилитрон КС168 (VD1), балластный резистор R4 сопротивлением 330 Ом и сглаживающий конденсатор C1 большой емкости на 5,0 мкФ.

Для уменьшения искажений в схеме используется отрицательная обратная связь по току (обратите внимание на отсутствие конденсатора, шунтирующего резистор R3).

3. Оборудование и приборы

1. Действующая схема полосового усилителя.
2. Генератор стандартных сигналов высокой частоты Г4-104.
3. Электронный вольтметр ВЗ-18 или ВЗ-38.
4. Источник питания ИЭПП-1 или ИПД-1.
5. Отвертка из диэлектрика.
6. Соединительные провода, в том числе две пары экранированных шнуров для подключения генератора и электронного вольтметра.

4. Сборка и опробование схемы

1. Установку для исследования полосового усилителя собирают по блок-схеме, приведенной на рисунке 8. Пределы измерений вольтметра необходимо поставить на 100÷300 мВ, а переключатель выходного напряжения генератора – в положение 10÷50 мВ. Диапазон частот генератора должен позволять получать

переменное напряжение частотой 465 ± 200 кГц. Собранныю схему предъявить для проверки преподавателю.

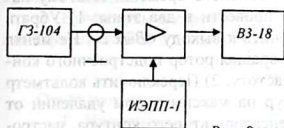


Рис. 8

2. После проверки схемы включить питание и установить требуемое напряжение питания – 5 В. Затем включить измерительные приборы (генератор, электронный вольтметр) и дать им прогреться в течение 1-2 минут. **ВНИМАНИЕ!** Включению генераторов высокой частоты, в состав

которых входят электровакуумные приборы, производится в два этапа: сначала включают тумблер «Сеть» и, дав катодам ламп прогреться, через 2 минуты включают анодное напряжение тумблером «Генератор ВЧ». В противном случае генератор может выйти из строя. Строго соблюдайте это требование на всех приборах, имеющих отдельное включение анодного напряжения!

3. Установить частоту генератора на соответствующий диапазон и вращая ручку регулировки частоты, наблюдать за показаниями вольтметра, включенного на выход «Вых. 2». Если при плавном увеличении или уменьшении частоты генератора наблюдается вначале повышение, а затем уменьшение выходного напряжения усилителя, то установка готова к работе. В противном случае следует повысить чувствительность вольтметра или увеличить выходное напряжение генератора.

5. Эксперименты и измерения

5.1. Настройка связанных контуров

1. Подключить электронный вольтметр к выходу «Вых. 1», второй контур установить в крайнее правое положение, соответствующее слабой связи. На вход усилителя подать переменное напряжение частотой 465 кГц.

2. Повернув электрической отверткой ротор конденсатора второго контура

в первый частотный диапазон

по малому показанию лампового вольтметра. По мере приближения к резонансу следует уменьшать напряжение на выходе генератора так, чтобы стрелка индикатора электронного вольтметра отклонялась не больше, чем на три четверти шкалы.

3. Аналогично, вращая ротор конденсатора только первого контура, добиться максимальных показаний вольтметра. Это будет второй частный резонанс.

4. Вновь вращая ротор конденсатора второго контура, убедиться, что ещё есть возможность увеличения выходного напряжения (тока).

Попеременно вращая роторы конденсаторов первого и второго контуров добиться такого положения, когда вращение ротора любого подстроечного конденсатора ведет к уменьшению показаний лампового вольтметра. Это - настройка в полный резонанс, когда оба контура вносят друг в друга минимальное и только активное сопротивление.

5. Описанный выше процесс точной настройки контуров в полный резонанс оказывается весьма трудоемким и требует много времени. Поэтому настройку фильтра в полный резонанс можно провести в два этапа: 1) Убрать второй контур с макета, а вольтметр подключить к выходу «Вых.2». Не меняя установленной частоты генератора (465кГц), вращая ротор подстроечного конденсатора, настроить первый контур на эту частоту. 2) Переключить вольтметр на выход «Вых.1» и поставить второй контур на максимальном удалении от первого. Вращая ротор подстроечного конденсатора второго контура, настроить его на ту же частоту 465 кГц. При этом сопротивления обоих контуров активны и вносимые сопротивления также активны.

5.2. Снятие амплитудно-частотных характеристик

1. Оставляя второй контур в крайнем правом, наиболее удаленном положении, соответствующем слабой связи, снять частотную характеристику усилителя, то есть, зависимость коэффициента усиления (или выходного напряжения) от расстройки при неизменном входном напряжении. Для этого вначале найти максимальное значение выходного напряжения, затем установить выходное напряжение генератора таким, чтобы стрелка электронного вольтметра находилась в правой части шкалы. Изменяя частоту генератора через каждые 5 кГц записывать в таблицу 1 значения выходного напряжения. Измерения провести в интервале 400÷520 кГц.

Таблица 1

Слабая связь		$U_{вх} =$ мВ						
Частота, кГц	...	450	455	460	465	470	475	...
$U_{вых}, мВ$								
$K = U_{вых} / U_{вх}$								

2. Не меняя настройки контуров, снять частотные характеристики для сильной связи, для чего переставить второй контур ближе к первому.

Таблица 2

Сильная связь		$U_{вх} =$ мВ						
Частота, кГц	...	450	455	460	465	470	475	...
$U_{вых}, мВ$								
$K = U_{вых} / U_{вх}$								

Проверив, что стрелка вольтметра не зашкаливает (при необходимости отрегулировать входное напряжение), записать показания электронного вольтметра в таблицу 2, сделанную по аналогии с таблицей 1. При заполнении таблицы положения двух максимумов нужно фиксировать точным значением частоты.

6. Обработка результатов исследования

1. По данным таблиц 1 и 2 построить частотные характеристики усилителя. Сравнить их и сделать выводы.

2. По частотным характеристикам определить полосу пропускания усилителя для случаев слабой и сильной связи между контурами, сделать соответствующие выводы.

3. Вычислить коэффициент прямоугольности частотной характеристики для случаев слабой и сильной связи. Сделать выводы.

7. Указания к отчету

Отчет должен содержать следующие материалы:

1. Наименование и цель работы.
2. Схему исследования.
3. Блок-схему установки.
4. Определения параметров усилителя.
5. Виды настройки в резонанс.
6. Таблицы измерений.
7. Амплитудно-частотные характеристики усилителя.
8. Расчетные данные (полоса пропускания, коэффициент прямоугольности).
9. Ответы на контрольные вопросы.

8. Вопросы для подготовки

1. Что представляет амплитудно-частотная характеристика полосового усилителя?
2. Как определяется ширина полосы пропускания идеального и реального фильтра?
3. Что называется избирательностью контура, фильтра?
4. Какие контуры называются связанными?
5. Как понимать «вносимое сопротивление»?
6. Что такое настройка в частный и полный резонанс?
7. Как определяется коэффициент прямоугольности амплитудно-частотной характеристики полосового фильтра?
8. Как влияет глубина связи между контурами на частотную характеристику связанных контуров?

9. Литература

1. Гершензон Е.М. и др. Радиотехника / Учебн. пособие для педвузов - М.: Просвещение, 1986, с. 44-51, 146-149.
2. Манаев Е.И. Основы радиоэлектроники. - М.: Радио и связь 1985, с. 290-293.
3. Молчанов А.П. Занадворов П. Н. Курс электроники и радиотехники. - М.: Наука, 1976, с. 102-108.

ИССЛЕДОВАНИЕ LC- И RC-ГЕНЕРАТОРОВ

1. Изучение устройства и принципа работы генераторов гармонических колебаний LC- и RC-типа.
2. Проверка условий самовозбуждения автогенератора.
3. Исследование влияния глубины обратной связи и режима работы транзистора на параметры электрических колебаний генератора.

Цель работы:

Содержание работы:

1. Исследование работы LC- и RC-генераторов на транзисторах.
1. Краткие теоретические сведения

В принципе, генератор - это преобразователь одного вида энергии в другой, а в отношении электронных генераторов можно говорить, как о преобразователях электрической энергии источника питания в энергию электрических колебаний. Генераторы, в которых колебания происходят самопроизвольно, без внешнего воздействия, называются автогенераторами.

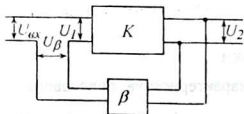


Рис. 1

Автогенератор представляет собой усилитель, охваченный положительной обратной связью (рис. 1). При этом напряжение на входе усилительного каскада равно сумме входного напряжения и напряжения обратной связи $\dot{U}_1 = \dot{U}_{вх} + \dot{U}_\beta$. Отсюда $\dot{U}_{вх} = \dot{U}_1 - \dot{U}_\beta$. Коэффициент усиления такого усилителя \dot{K}_β в комплексной форме определяется по формуле:

$$\dot{K}_\beta = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_{вх}} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1 - \dot{U}_\beta} = \frac{\frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1}}{1 - \frac{\dot{U}_\beta \cdot \dot{U}_2}{\dot{U}_1 \cdot \dot{U}_2}} = \frac{\dot{K}}{1 - \dot{\beta} \cdot \dot{K}}$$

где $\dot{K} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1}$ - коэффициент усиления усилителя без обратной связи, а $\dot{\beta} = \frac{\dot{U}_\beta}{\dot{U}_2}$ - коэффициент передачи цепи обратной связи.

Для того чтобы данный усилитель стал генерировать, необходимо соблюдение двух условий - это условие баланса фаз и условие баланса амплитуд. В автогенераторе при отсутствии внешнего воздействия (то есть, при $U_{вх} = 0$) на входе действует только напряжение обратной связи $\dot{U}_\beta = \dot{\beta} \dot{U}_2$, которое, будучи усилено в \dot{K} раз, должно быть вновь равно выходному напряжению \dot{U}_2 , то есть, $\dot{U}_2 = \dot{K} \dot{U}_\beta = \dot{K} \dot{\beta} \dot{U}_2$, отсюда $\dot{\beta} \dot{K} = 1$. Это соотношение называется общим условием самовозбуждения генератора.

Представим комплексные величины $\hat{\beta}$ и \hat{K} в тригонометрической форме $\hat{\beta} = \beta e^{j\varphi_1}$, $\hat{K} = K e^{j\varphi_2}$, где φ_1 и φ_2 - сдвиг фазы в усилителе и цепи обратной связи. Подставив в общее условие самовозбуждения $\hat{\beta}\hat{K} = 1$, получим $\beta K e^{j(\varphi_1 + \varphi_2)} = 1$. Это выражение можно представить в виде двух равенств: $\beta K = 1$ и $\varphi_1 + \varphi_2 = 0$. Первое равенство называется *условием баланса амплитуд*, второе - *условием баланса фаз*.

Очевидно, самовозбуждение возможно также и при $\beta K > 1$. При этом амплитуда колебаний возрастает, но не бесконечно, и ввиду нелинейности амплитудной характеристики усилительного каскада обязательно установится такой режим, при котором указанное неравенство обращается в равенство $\beta K = 1$.

Поскольку в автогенераторе входное и выходное напряжения \hat{U}_β и \hat{U}_2 взаимосвязаны и полностью определяют друг друга, мгновенное значение напряжения (\hat{U}_β или \hat{U}_2) одновременно есть то же самое напряжение, прошедшее через кольцо из усилителя и цепи обратной связи. Это возможно, если полный фазовый угол прохождения сигнала по кольцу, $\Delta\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 = 0, 2\pi, 4\pi, \dots$ то есть, $\Delta\varphi = \Sigma\varphi = 2n\pi$ (где $n = 0, 1, 2, \dots$).

Существуют различные схемы автогенераторов, однако рассмотренные выше условия самовозбуждения являются общими для всех.

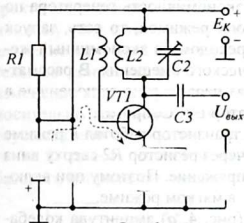


Рис. 2

LC-генераторы. Генераторы с колебательными контурами применяются для получения высокочастотных колебаний. Частота колебаний LC-генератора определяется параметрами колебательного контура и без учета влияния остальных элементов схемы можно считать $\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$.

Автогенератор с индуктивной обратной связью (рис. 2), представляет собой резонансный усилитель с контуром $L2C2$ в цепи коллектора.

К усилителю подключена цепь положительной обратной связи в виде катушки связи $L1$ и разделительного конденсатора $C1$, позволяющего все переменное напряжение с катушки $L1$ приложить между базой и эмиттером транзистора $VT1$.

Коэффициент обратной связи определяется значением коэффициента взаимной индукции M между катушками $L2$ и $L1$: $\beta = \frac{M}{L2}$. Величина связи регулируется изменением расстояния между катушками. Изменение знака обратной связи достигается переключением выводов катушки обратной связи.

Различают два режима самовозбуждения: *мягкий* и *жесткий*. *Мягкий режим самовозбуждения* характеризуется тем, что в режиме покоя транзистор открыт, и автогенератор самовозбуждается, то есть, начинает работать самостоятельно, при появлении даже весьма слабых случайных сигналов (например, флуктуация тока). Генератор практически начинает работать с нуля (рис. 3, а). Для этого транзистор должен работать в режиме усиления класса А, то есть транзистор открыт всегда, даже в режиме покоя.

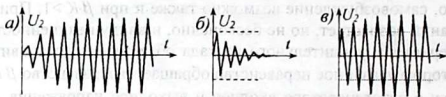


Рис. 3

Когда транзистор в режиме покоя заперт, возбуждение генератора возможно, если на базе транзистора возникнет случайный импульс, имеющий достаточно большую амплитуду, чтобы приоткрыть транзистор (рис. 3, в). Это *жесткий режим самовозбуждения*. На рисунке 3, б показано, что, если начальный импульс меньше напряжения отпирания транзистора, возникшие колебания затухают.

В мягком режиме через транзистор наряду с переменным током протекает значительный постоянный ток, что снижает экономичность генератора по сравнению с жестким режимом. Совмещение обоих режимов, то есть, запуск генератора в мягком режиме, с последующим переходом на экономичный жесткий режим, осуществляется цепочкой автоматического смещения. В рассматриваемой схеме (см. рис. 2) для этого служат параллельно включенные в базовую цепь транзистора резистор $R2$ и конденсатор $C1$. Сопротивления резисторов $R1$ и $R2$ подобраны таким образом, чтобы транзистор работал в режиме усиления класса А. Ток делителя $R1R2$ протекает через резистор $R2$ сверху вниз и создает на нем положительное открывающее напряжение. Поэтому при включении питания генератор сразу начинает работать в мягком режиме.

По мере нарастания колебаний генератора (рис. 4, а) амплитуда колебаний напряжения на катушке связи $L1$ начинает превышать величину открывающего напряжения делителя и в отдельные отрезки времени эмиттерный $p-n$ -переход оказывается закрытым и через базу протекает пульсирующий ток, имеющий постоянную составляющую (рис. 4, б). Постоянная составляющая пульсирующего тока протекает через резистор $R2$ снизу вверх (см. рис. 2) и создает на нем отрицательное запирающее напряжение.

Постепенно запирающее напряжение становится больше открывающего напряжения делителя, постоянное напряжение на базе становится отрицательным (рис. 4, в) и генератор автоматически переходит в жесткий режим самовозбуждения.

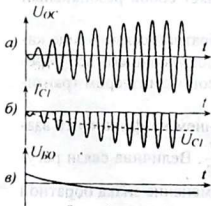


Рис. 4

Конденсатор $C1$ необходим, чтобы переменная составляющая пульсирующего тока замыкалась через него, а постоянная составляющая протекала через резистор $R2$ и напряжение на нём было постоянным.

Определенную помощь в переводе генератора в жесткий режим оказывает также цепочка термостабилизации $R3C3$. Например, по мере увеличения амплитуды колебаний генератора постоянный ток через резистор $R3$ возрастает и на нем также создается запирающее напряжение, что способствует переводу генератора в жесткий режим работы.

Режимы работы генератора. Автогенератор может работать в следующих режимах: *недонапряженном, перенапряженном и критическом*. В зависимости от режима работы генератора импульсы коллекторного тока имеют форму правильной синусоиды (недонапряженный режим) (рис. 5, а), части синусоиды, иногда с плоской вершиной, (критический режим) (рис. 5, б), или с провалом в верхней ее части (перенапряженный режим) (рис. 5, в). Наличие впадины характеризуется резким увеличением тока базы и перераспределением токов в транзисторе при чрезмерном увеличении коэффициента обратной связи - β .

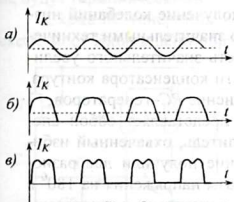


Рис. 5

Наличие впадины характеризуется резким увеличением тока базы и перераспределением токов в транзисторе при чрезмерном увеличении коэффициента обратной связи - β .

Трёхточечные схемы. Широкое распространение на практике получили трёхточечные схемы автогенераторов, в которых контур соединяется по переменному току с эмиттером, коллектором и базой тремя точками (рис. 6, 7). Соединение контура с эмиттером в схеме (рис. 6) осуществляется через разделительные конденсаторы $C4, C5$, а с базой - через конденсатор $C1$. Так как изменение коллекторного напряжения транзистора всегда сдвинуто на 180° относительно изменения базового напряжения, присоединение контура к базе осуществлено через точку B , напряжение которой противофазно напряжению в точке K , то есть, сдвинуто на 180° . При этом общий сдвиг фазы относительно базового напряжения оказывается равным $\Delta\varphi = 180^\circ + 180^\circ = 360^\circ$.

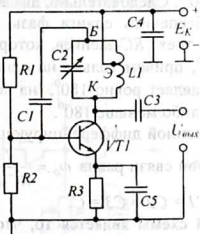


Рис. 6

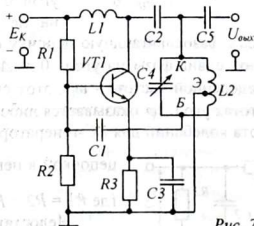


Рис. 7

Этот же принцип работы соблюдается, если схему питания генератора с последовательным питанием (рис. 6) преобразовать в схему с параллельным

питанием (рис. 7). Контур $C4L2$ присоединен к базе, коллектору и эмиттеру через конденсаторы $C1$, $C2$ и $C3$ соответственно. В данной схеме с параллельным питанием через контур протекают только переменные токи. Разделение переменного и постоянного токов производится с помощью дросселя $L1$ и разделительного конденсатора $C2$, которые имеют неодинаковые сопротивления для постоянного и переменного токов.

Данную схему можно преобразовать в автогенератор с емкостной обратной связью. Для этого достаточно взамен одного трехточечного контура поставить другой, с емкостным делителем (рис. 8).

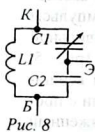


Рис. 8

LC-генераторы, как правило, применяются для получения высокочастотных колебаний, так как получение колебаний низких и сверхнизких частот сопряжено со значительными техническими трудностями: это - необходимость значительного увеличения индуктивности катушки и емкости конденсатора контура. В этом случае предпочтительнее применение **RC-генераторов**.

RC-генераторы. RC-генератор представляет собой аperiodический (нерезонансный, широкополосный) усилитель, охваченный избирательной обратной связью. Широкое распространение получили две разновидности RC-генераторов: генераторы с поворотом фазы напряжения на 180° в цепи обратной связи (генераторы с фазосдвигающими цепочками) и генераторы без поворота фазы напряжения (генераторы с мостом Вина или 2Т-мостом).

Генератор с поворотом фазы на 180° (рис. 9) представляет собой однокаскадный усилитель с общим эмиттером, имеющим три и больше дифференцирующие (или интегрирующие) RC-звенья в цепи обратной связи ($R1C1$, $R2C2$, $R3C3$).

Одна дифференцирующая RC-цепочка может повернуть фазу напряжения сигнала в зависимости от его частоты на угол $0 < \Delta\varphi < 90^\circ$. Следовательно, два звена не могут обеспечить сдвига фазы на

180° . Поэтому фазосдвигающую цепочку строят из трех RC-звеньев, которые обеспечивают сдвиг фазы на угол $0 < \Delta\varphi < 270^\circ$, причем только на одной, строго определенной частоте - ω_0 , этот сдвиг составляет ровно 180° , на всех других частотах угол $\Delta\varphi$ оказывается либо больше, либо меньше 180° .

Частота колебаний для RC-генератора с трехзвенной дифференцирующей цепочкой в цепи обратной связи равна $\omega_0 = \frac{1}{RC\sqrt{6}}$,

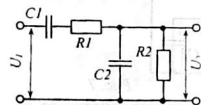


Рис. 10

где $R1 = R2 = R3 = R$, $C1 = C2 = C3 = C$.
Недостатком этой схемы является то, что в цепи обратной связи в сильной мере гасится энергия обратной связи и поэтому требуется усиленный элемент с большим коэффициентом усиления ($K \geq 29$).

На практике широко применяются RC -генераторы с мостом Вина. Основным свойством моста Вина (рис. 10) является то, что только на одной единственной частоте $\omega = \omega_0$ его выходное напряжение совпадает по фазе с входным, то есть, сдвиг фазы $\Delta\varphi = 0$. На всех остальных частотах сдвиг фазы $\Delta\varphi \neq 0$.

Мост Вина включают между входом и выходом двухкаскадного усилителя, в котором в процессе усиления в двух каскадах фаза выходного напряжения уже сдвинута на угол $\Delta\varphi = 180^\circ + 180^\circ = 360^\circ$ относительно входного (вспомните «золотое правило» транзистора). Если просто соединить выход усилителя с его входом, условие баланса фаз будет соблюдаться для любых частот и колебания не будут гармоническими.

Схема RC -генератора с мостом Вина приведена на рисунке 11. В данной схеме мост Вина в цепи обратной связи составлен из резисторов $R1, R2$ и конденсаторов $C1, C2$.

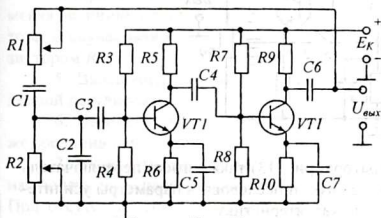


Рис. 11

Плавное изменение частоты RC -генератора достигается изменением параметров моста с помощью переменных резисторов $R1, R2$. Для этого достаточно изменять величину сопротивления одного из них или обоих одновременно.

RC -генераторы имеют простую схему, доста-

точно широкий диапазон генерируемых частот, надёжны. Однако стабильность частоты невысокая, особенно при изменениях температуры. Диапазон генерируемых частот не превосходит 100 кГц.

2. Схемы исследования

В качестве объектов исследования в данной работе предлагаются схемы LC -генератора с индуктивной обратной связью и RC -генератора с мостом Вина в цепи обратной связи.

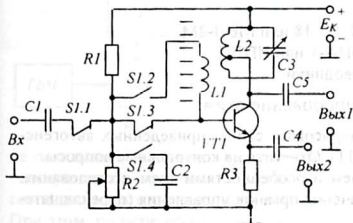


Рис. 12

Схема исследования LC -генератора (рис. 12) позволяет с помощью переключателя $S1$ установить схему в режим усиления или генерации.

В режиме усиления установка позволяет снять амплитудную характеристику усилителя. Выходное напряжение схемы как усилителя или генератора контролируется на выходе « $B_{вых1}$ ». Режим усиления устанавливается потенциометром $R2$. Контроль формы импульсов коллекторного тока осуществляется

на выходе «Вых2»). Настройка частоты контура (а, следовательно, и генератора) производится конденсатором переменной ёмкости $C3$. Величина обратной связи регулируется изменением расстояния между катушками $L1$ и $L2$. Расстояние измеряется в миллиметрах по линейке (см. рис. 12).

Обратите внимание на способ включения контура: чем меньше связь контура с транзистором (имеющим небольшое выходное сопротивление) и нагрузкой, тем выше его добротность и острее резонансная характеристика. Поэтому в схеме используется неполное включение контура, то есть, с транзистором связана только часть витков катушки $L2$.

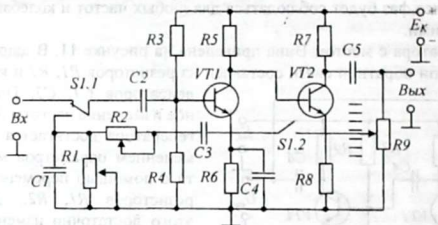


Рис. 13

Схема исследования RC -генератора (рис. 13) также имеет переключатель $S1$, позволяющий отключать обратную связь и исследовать параметры усилителя, в частности, снять его амплитудную характеристику.

Потенциометр $R9$ позволяет регулировать величину обратной связи. Изменение сопротивления любого из резисторов $R1$ или $R2$ влияют на частоту колебаний генератора.

3. Оборудование и приборы

1. Макет LC -генератора.
2. Макет RC -генератора.
3. Генератор высокой частоты Г4-102.
4. Генератор низкой частоты Г3-18.
5. Осциллограф ОДШ-2.
6. Электронный вольтметр ВЗ-38, ВЗ-18 или МВЛ-2М.
7. Источник электропитания ИЭПП-1 или ИПД-1.
8. Соединительные шнуры и проводники.

4. Сборка и опробование схем

1. Ознакомиться с описанием. Зарисовать схемы приведенных автогенераторов LC - и RC -типа (рис. 2, 6, 7, 9, 11). Ответить на контрольные вопросы.
2. Ознакомиться с оборудованием и особенностями схем исследования. Зарисовать обе схемы. Записать назначение органов управления (переключателей и потенциометров).

3. Вначале провести эксперименты с LC-генератором. Подключить выход «Вых1» LC-генератора к входу «У» осциллографа и, подав соответствующее питание, включить схему. Установив генератор в режим генерации, добиться на экране осциллографа устойчивого изображения колебаний генератора. Если генерации нет, следует увеличить обратную связь, приближая катушку $L1$ к контурной катушке $L2$. Если это не помогает, перевернуть на 180° катушку связи $L1$. На запуск и режим работы генератора оказывает влияние также сопротивление резистора $R2$. При уменьшении его сопротивления генератор работает в жестком режиме. Чтобы обеспечить мягкий запуск генератора, сопротивление $R2$ следует увеличить. Однако чрезмерное увеличение сопротивления $R2$ может привести к возрастанию базового тока и уменьшению усиления транзистора.

4. Подключив осциллограф к выходу «Вых2» генератора и, медленно изменяя величину обратной связи, установить критический режим работы генератора. В случае необходимости регулировать напряжение базового смещения резистором $R2$.

5. Выключить питание. Отсоединить LC-генератор, не трогая установленной регулировки.

6. На место LC-генератора подключить исследуемый RC-генератор, так же соединив с источником питания и осциллографом. Включить питание.

7. Включить цепь обратной связи и, добившись устойчивой генерации, наблюдать на экране осциллографа осциллограмму колебаний RC-генератора. При отсутствии генерации увеличивать величину обратной связи резистором $R9$.

8. Проверить эффективность регулировки обратной связи ($R9$) и частоты генератора ($R1, R2$).

5. Эксперименты и измерения

1. Собрать ...
(рис. 14). Установить LC-генератор в режим ...

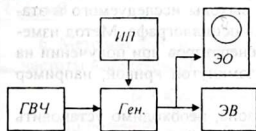


Рис. 14

поставить на среднюю емкость. Уровень выходного напряжения генератора высокой частоты (ГВЧ) поставить на пределы 10 - 100 мВ. Осциллограф и электронный вольтметр подключить к выходу «Вых1» LC-генератора.

2. После проверки схемы включить питание и подать переменное высокочастотное напряжение частотой 500 Гц. Если вольтметр не показывает выходного напряжения, нужно перевести его на более чувствительную шкалу и, плавно изменяя частоту ГВЧ, добиться резонанса, то есть, совпадения частоты внешнего сигнала с собственной частотой контура $L2C3$. При этом, по мере необходимости, переходить к более грубой шкале вольтметра. Найденную частоту записать в первую строку таблицы 1.

3. Снять амплитудную характеристику усилителя на этой частоте. Для этого установить минимальное входное напряжение и затем, повышая его, каждый раз записывать в таблицу 1 значения входного и выходного напряжений.

Таблица 1

		Частота =					
$U_{вх}, мВ$	10	20	40	60	80	100	120
$U_{вых}, мВ$							

4. По окончании измерений выключить генератор высокой частоты и перевести схему в режим «Генерация». При этом изображение колебаний на экране осциллографа изменится, но это будут собственные колебания генератора.

5. Выключить установку и переключить осциллограф на выход «Вых2», оставив электронный вольтметр включенным на выходе «Вых1». Настройку контура генератора не изменять.

6. Вновь включить установку (без генератора ГВЧ). Убедившись в наличии генерации, снять зависимость выходного напряжения генератора от величины обратной связи. Для этого, изменяя расстояние между катушками $L1$ и $L2$, записывать в таблицу 2 расстояния и соответствующие выходные напряжения генератора.

Таблица 2

$L, мм$							
$U_{вых}, мВ$							

Одновременно наблюдая за экраном осциллографа, зарисовать осциллограммы коллекторного тока при недонапряженном, критическом и перенапряженном режимах работы генератора.

Выключить питание и переставить катушку $L1$, повернув её на 180° . Включив питание, убедиться в отсутствии колебаний при любой величине связи между катушками $L2$ и $L1$. Сделать выводы.

8. Методом фигур Лиссажу измерить максимальную и минимальную частоту, то есть, рабочий диапазон частот исследуемого генератора. Для этого, предварительно включив питание, присоединить выходы исследуемого и эталонного (ГВЧ) генераторов к выходам «X» и «Y» осциллографа. Метод измерения заключается в сравнении кратных частот генераторов при получении на экране осциллографа устойчивого изображения замкнутой кривой, например эллипса.

Чтобы определить верхнюю границу диапазона, необходимо установить переменный конденсатор $C3$ в положение минимальной емкости и, изменяя частоту эталонного генератора (при коэффициенте модуляции $m = 0$), получить на экране осциллографа изображение в форме эллипса, что говорит о совпадении частот обоих генераторов. Записать частоту f_{max} . Так же измерить частоту f_{min} при максимальном значении емкости переменного конденсатора $C3$.

5.2. Исследование RC-генератора.

Для исследования RC-генератора потребуются те же приборы, за исключением эталонного высокочастотного генератора (ГВЧ), который заменяется на низкочастотный. Произвести соединения согласно рисунку 14.

1. С помощью переключателя $S1$ отключить цепь обратной связи, установить режим «Усиление». Эталонный генератор установить на частоту $f=1000$ Гц, выходное напряжение 10 мВ. Ручки переменных резисторов $R1$, $R2$, $R9$ поставить в среднее положение.

2. Изменяя входное напряжение и, измеряя соответствующее выходное напряжение электронным вольтметром, заполнить таблицу 3.

Таблица 3

Частота =							
$U_{вх}$, мВ	10	50	90	130	170	210	250
$U_{вых}$, мВ							

3. Выключить эталонный генератор и переключить схему в режим «Генерация». Регулируя величину обратной связи потенциометром $R9$, добиться получения устойчивых колебаний синусоидальной формы.

4. Переключить эталонный генератор на вход «X» осциллографа и, изменяя сопротивления переменных резисторов $R1$ и $R2$, установить частоту колебаний RC-генератора $f=1000$ Гц. Контроль частоты производится по фигурам Лиссажу.

5. Отключить эталонный генератор от осциллографа. Переключить осциллограф в режим непрерывной развертки. Изменяя величину обратной связи резистором $R9$ записывать в таблицу 4 значения выходного напряжения RC-генератора. Одновременно наблюдать за формой колебаний генератора. Отметьте минимальное значение β , при котором колебания срываются. Отметьте также значение β для критического режима генератора.

Таблица 4

β	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	...
$U_{вых}$, мВ							

6. Методом Фигур Лиссажу измерить минимальную f_{min} и максимальную f_{max} частоты исследуемого RC-генератора.

6. Обработка результатов исследования

1. По полученным данным таблиц 1, 2, 3, 4 построить графики амплитудных характеристик усилительных каскадов и колебательных характеристик LC- и RC-генераторов.

2. Отметить на графиках точки, соответствующие критическому режиму и вычислить значения β для данного режима обоих генераторов.

7. Указания к отчету

Отчет должен содержать следующие материалы:

1. Наименование и цель работы.

2. Схемы LC - и RC -генераторов с указанием особенностей работы.
3. Схемы исследования LC - и RC -генераторов.
4. Таблицы наблюдений.
5. Осциллограммы выходного тока генераторов в недонапряженном, критическом и перенапряженном режимах.
6. Графики амплитудных характеристик усилителей и колебательных характеристик генераторов.
7. Значения β и $U_{вых}$ для критического режима.
8. Краткие выводы о работе.
9. Ответы на контрольные вопросы.

8. Вопросы для подготовки.

1. Является ли усилитель генератором?
2. Каковы условия самовозбуждения генератора?
3. В чем заключаются преимущества и недостатки мягкого и жесткого режима работы генератора?
4. В чем состоят особенности последовательного и параллельного питания генераторов?
5. Какой генератор называют трехточечным?
6. Как объяснить возникновение гармонических колебаний в RC -генераторе?
7. Каковы достоинства и недостатки LC - и RC -генераторов?
8. Что такое обратная связь? Виды обратной связи.
9. Как влияет обратная связь на работу усилителя?
10. Чем объяснить искажение формы колебаний в генераторе?
11. Почему генерация прекращается, если катушку обратной связи генератора повернуть на 180° ?

9. Литература

1. Гершензон Е. М. и др. Радиотехника. Учебное пособие для педвузов - М.: Просвещение, 1986, с.170-185.
2. Манаев Е. И. Основы радиоэлектроники. - М.: Радио и связь, 1985, с.306-314, 321-326.
3. Молчанов А. П., Занадворов П.Н. Курс электротехники и радиотехники - М.: Наука, 1976, с. 376, 385-394.
4. Павлов В.Н., Ногин В.Н. Схемотехника аналоговых электронных устройств. Учебник для вузов. - М.: Горячая линия – Телеком, 2001.
5. Прянишников В.А. Электроника: Курс лекций – СПб: Корона принт, 2000.

ИЗУЧЕНИЕ РЕЛАКСАЦИОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Цель работы:

1. Изучение принципов получения импульсных колебаний и физических процессов, протекающих в релаксационных генераторах.

Содержание работы:

2. Изучение схем и работы релаксационных генераторов.

1. Исследование генераторов пилообразного напряжения.

1. Краткие теоретические сведения

В современных телевизионных, электронно-вычислительных и других электронных устройствах широкое применение находят генераторы, выходное напряжение которых имеет форму, резко отличающуюся от синусоидальной. Колебания, такой формы носят название импульсных и делятся на прямоугольные, пилообразные, треугольные, трапецеидальные и т. п.

В основе работы импульсных генераторов лежат релаксационные процессы. *Релаксационные процессы* – это процессы, протекающие при переходе устройства или системы из одного состояния в другое, например, процесс установления температуры электроплитки после включения и после выключения.

Работа импульсных генераторов основана на процессах перехода элементов от открытого состояния к закрытому, и, наоборот, от закрытого состояния – к открытому. Эти процессы не протекают мгновенно, а занимают определенной время, и называются релаксационными (переходными).

Релаксационные генераторы используются в качестве переключающих устройств для деления частоты, развертки электронного луча в электронных приборах. Подобно генераторам гармониче-

ских колебаний, в генераторах постоянного тока в энергию электронного генератора гармонических колебаний LC -типа происходит непрерывный обмен энергией между конденсатором и катушкой контура, и за период колебаний расходуется лишь незначительная часть энергии, полученной от источника, то в релаксационном генераторе энергия источника сосредотачивается в реактивном элементе одного типа, обычно конденсаторе, которая затем выделяется в виде тепла на активных сопротивлениях резисторов.

В релаксационном генераторе электронный прибор (лампа, транзистор или тиристор) работает в ключевом режиме, переключая конденсатор с заряда на разряд и наоборот. При этом работа электронных приборов характеризуется резкими переходами от открытого состояния к закрытому состоянию и обратно. Такие колебания имеют богатый спектральный состав, то есть, содержат множество гармонических составляющих.

1. Одним из простейших релаксационных генераторов является *генератор пилообразного напряжения на неоновой лампе* (рис. 1, а). Генерирование пилообразных колебаний происходит за счет заряда и разряда конденсатора $C1$.

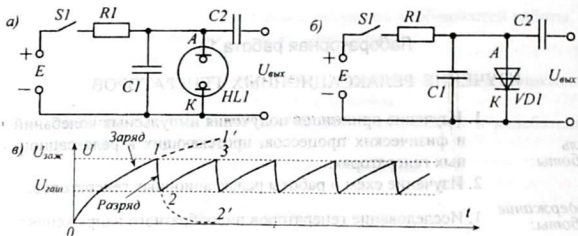


Рис. 1

Неоновая лампа представляет собой баллон, заполненный нейтральным газом – неоном при низком давлении, в котором расположены два электрода – анод и катод. В обычных условиях в баллоне всегда имеется незначительное количество свободных электронов и положительных ионов, образовавшихся за счет естественных ионизаторов (космические лучи, фоновая радиоактивность и др.). Если между анодом и катодом приложить напряжение, то при низком напряжении через лампу потечет настолько ничтожный ток, что практически можно считать, что лампа полностью закрыта.

Если повышать напряжение между анодом и катодом, свободные электроны сильно ускоряются и их кинетическая энергия достигает такой величины, что её оказывается достаточно, чтобы ионизировать нейтральные атомы газа. Получившиеся при ионизации новые электроны также ускоряются и ионизируют другие атомы. Число носителей заряда растет лавинообразно, сопротивление лампы резко уменьшается (практически до нуля). Число носителей заряда возрастает настолько, что электроны начинают сталкиваться с положительными ионами и рекомбинировать. При рекомбинации выделяется световое излучение. Поэтому прохождение тока через газоразрядный прибор сопровождается одновременным свечением газа. Цвет свечения зависит от рода газа. Например, неон светится красным цветом.

Напряжение, при котором лампа начинает пропускать ток, называется напряжением зажигания - $U_{зж}$. Если после того, как лампа зажглась, постепенно уменьшать напряжение между анодом и катодом, лампа продолжает светиться (пропускать ток) и при более низких напряжениях, вплоть до некоторого напряжения, при котором лампа гаснет и перестает пропускать ток. Это напряжение называется напряжением гашения - $U_{гаш}$.

В исходном состоянии неоновая лампа HL1 заперта (см. рис. 1) и в разреженном газе (неоне) практически отсутствуют свободные носители зарядов. Поэтому конденсатор C1 медленно заряжается через резистор R1 по цепи: $-E - R1 - C1 - -E$. Процесс заряда (см. рис. 1, в) происходит по экспоненте $0 - 1'$. Однако процесс заряда прекращается в точке 1, соответствующей напряжению зажигания лампы $U_{зж}$, при котором возникает лавинообразный процесс (цепная реакция) нарастания числа пар «ион-электрон» за счет ударной ионизации. При этом разряд сопровождается свечением газа.

Сопротивление зажженной лампы $r_{зж}$ ничтожно мало по сравнению с сопротивлением незажженной ($r_{зж} \approx 0$). Поэтому конденсатор $C1$ быстро разряжается через нее (кривая разряда идет по экспоненте 1-2'). Причем, конденсатор не может полностью разрядиться, так как с понижением напряжения на конденсаторе до напряжения гашения лампы $U_{гаш}$, скорости ионов и их энергия уменьшается, что приводит к прекращению ударной ионизации. Лампа гаснет и запирается (точка 2).

С момента запираания лампы (точка 2) процесс заряда конденсатора возобновляется (кривая 2-3) и весь описанный процесс вновь повторяется.

Период колебаний генератора складывается из времени заряда конденсатора $\tau_{зар}$ и разряда $\tau_{разр}$, то есть, $T = \tau_{зар} + \tau_{разр}$. Время заряда зависит от постоянной времени RC -цепи $\tau_{зар} = R1C1$, а разряда - $\tau_{разр} = r_{зж}C1$. Так как $r_{зж} \ll R1$, период колебаний в основном определяется значениями $R1$ и $C1$, которые можно изменять для установки частоты генератора.

Аналогичный генератор может быть построен на полупроводниковом приборе - диносторе, обладающем характерными напряжениями открывания $U_{откр}$ и запираания $U_{зан}$, поэтому если вместо неоновой лампы включить диностор, то принцип работы схемы не изменится. Но при этом надо снизить напряжение питания до единиц и десятков вольт (см. рис. 1, б).

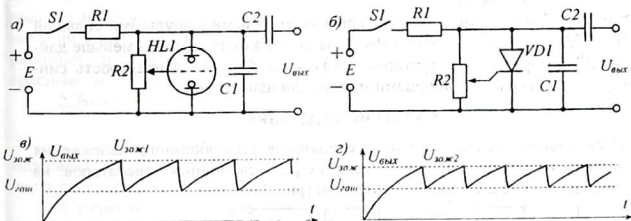


Рис. 2

Описанные выше генераторы пилообразного напряжения весьма нестабильны в работе и плохо поддаются внешней синхронизации, то есть, подчинению частоты собственных колебаний генератора внешним синхронизирующим импульсам. Поэтому более совершенным является генератор на тиратроне, газоразрядном приборе, с управляющей сеткой (рис. 2, а) или его полупроводниковом аналоге - тиристоре с напряжениями открывания $U_{откр}$ и запираания $U_{зан}$ (рис. 2, б).

Принцип работы генератора с управляющим электродом остается прежним (рис. 2, в), однако, изменяя напряжение на управляющем электроде тиратрона (или тиристора), можно в широких пределах изменять напряжение открывания лампы (или пробоя тиристора). Чем больше управляющее

напряжение, тем легче загорается лампа, то есть, уменьшается напряжение $U_{зж}$. При этом сокращается время заряда конденсатора $C1$ и частота возрастает (см. рис. 2, а). Следует отметить, что на величину $U_{зж}$ управляющее напряжение не влияет, причем в процессе пробоя управляющий электрод вообще теряет управляющие свойства (пока не закончится разряд).

Полупроводниковый аналог тиратронного генератора (рис. 2, б) построен на тиристоре. Подавая открывающее напряжение на управляющий электрод, можно изменять напряжение пробоя тиристора и тем самым, изменять частоту колебаний генератора.

Поскольку частота колебаний релаксационных генераторов нестабильна, на практике для получения стабильной работы одного генератора или синхронной работы нескольких генераторов, например в телевидении, применяется синхронизация.

Синхронизация работы генератора заключается в подчинении частоты его колебаний колебаниям другого (задающего) генератора. Синхронизация осуществляется подачей кратковременных остроконечных импульсов с периодом следования меньшим, чем период колебаний самого генератора, то есть, $T_{синх} < T_{ген}$ ($f_{синх} > f_{ген}$). При этом поступающий синхрои импульс заставляет лампу или транзистор открыться досрочно, то есть, до того момента, когда лампа или тиристор открылись бы самостоятельно (аналогично искусственно вызываемому сходу лавин).

Синхронизация осуществляется кратковременными импульсами большой амплитуды. Длительность синхрои импульсов должна быть намного меньше длительности формируемых генератором импульсов. Обычно длительность синхрои импульсов измеряется единицами микро- или наносекунд.

2. Схемы исследования

Исследование релаксационных генераторов пилообразного напряжения производится на макете, состоящем из двух релаксационных генераторов: на неоновой лампе ТН-0,2 и тиратроне МТХ-90 (рис. 3).

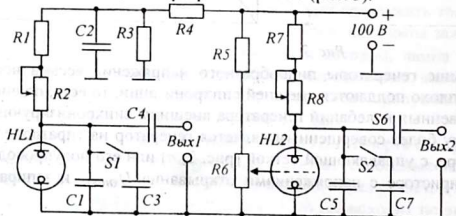


Рис. 3

В схемах предусмотрена возможность изменения частоты колебаний подключением конденсаторов $C3$ и $C7$, что увеличивает заряжаемую емкость и увеличивает период колебаний. Плавное изменение частоты колебаний в обоих

схемах осуществляется переменными резисторами $R2$ и $R8$. Резисторы $R1$ и $R7$ предохраняют лампы от перегрузки на тот случай, когда сопротивления $R2$ и $R8$ будут уменьшены до нуля. Регулируемый делитель напряжения $R5R6$ позволяет изменять напряжение смещения на сетке тиратрона и управлять частотой колебаний путем увеличения или уменьшения напряжения зажигания тиратрона.

Делитель $R4R3$ устанавливает пониженное напряжение питания для генератора на неоновой лампе. Конденсатор $C2$ совместно с резистором $R4$ образует развязывающий фильтр и устраняет влияние одного генератора на работу другого генератора.

3. Оборудование и приборы

1. Макет релаксационных генераторов пилообразного напряжения на неоновой лампе и тиратроне (или на динисторе и тиристоре).
2. Источник питания УИП-2.
3. Осциллограф ОДШ-2.
4. Частотомер ИЧ-6.
5. Соединительные провода и шнуры.

4. Сборка и опробование схем

1. Присоединить макет с генераторами пилообразного напряжения к выходу « $20 \div 300$ В» источника питания УИП-2. Переключатель и регулятор выходного напряжения источника поставить в крайнее левое положение. Включить питание и установить выходное напряжение 100 В. Если генераторы работают, то лампы, благодаря рекомбинации электронов и ионов светятся красным светом (признак работы генератора).

2. Выключив питание, к выходу 1 подключить осциллограф. После включения получить на экране устойчивое изображение колебаний выходного напряжения. Если изображение неустойчиво, то изменить частоту колебаний и протестировать

на устойчивость регулировки частоты генератора переключением регулятора частоты. Если изображение неустойчиво, то изменить частоту колебаний и протестировать на устойчивость регулировки частоты генератора переключением регулятора частоты. Если изображение неустойчиво, то изменить частоту колебаний и протестировать на устойчивость регулировки частоты генератора переключением регулятора частоты. Если изображение неустойчиво, то изменить частоту колебаний и протестировать на устойчивость регулировки частоты генератора переключением регулятора частоты.

3. Переключить осциллограф на выход 2 и наблюдать на экране осциллографа пилообразные колебания выходного напряжения тиратронного генератора. Убедиться в возможности регулировки частоты колебаний с помощью переменных резисторов $R6$ и $R8$. Выключить питание.

5. Эксперименты и измерения

1. Изучить схемы и принцип работы релаксационных генераторов пилообразного напряжения. Зарисовать схемы и записать особенности их работы.

2. Включить собранную схему генератора пилообразного напряжения. Подключить осциллограф к выходу 1, получить на экране изображение пилообразных колебаний. Зарисовать в тетрадь.

3. Параллельно входу осциллографа подключить измеритель частоты. Изменяя частоту колебаний переменным резистором $R2$, измерить максимальную и минимальную частоту генератора на неоновой лампе.

4. Аналогичную работу провести с тиратронным или тиристорным генератором. Максимальную и минимальную частоту колебаний устанавливать регулировкой сопротивления $R8$ и напряжения делителя резистором $R6$. Выключить питание.

Так как для синхронизации этих генераторов требуются импульсы большой амплитуды, опыты по синхронизации их колебаний в данной работе не предусмотрены.

6. Указания к отчету

Отчет должен содержать следующие материалы:

1. Наименование и цель работы
2. Принцип работы релаксационных генераторов.
3. Схемы генераторов пилообразного напряжения на ионных приборах.
4. Осциллограммы колебаний.
5. Ответы на контрольные вопросы.

7. Вопросы для подготовки

1. Какие генераторы называются релаксационными?
2. В чем их отличие релаксационных генераторов от генераторов с колебательными контурами?
3. Как работает генератор пилообразного напряжения на неоновой лампе?
4. Почему светится газ в неоновой лампе при прохождении тока?
5. В чем преимущество генератора пилообразного напряжения на тиратроне?
6. Можно ли построить импульсные генераторы на динисторах и тиристорах?
7. Что такое синхронизация работы генераторов?

8. Литература .

1. Гершензон Е.М и др. Радиотехника, учеб. пособие для педвузов – М.: - Просвещение, 1986, с. 187-190.
2. Манаев. Е.И. Основы радиозлектроники. – М.: Радио и связь, 1985, с. 340-347.
3. Молчанов А. П., Занадворов П.Н. Курс электротехники и радиотехники. – М.: Наука, 1976, с. 401-421.
4. Халиуллин Р.Н., Саримсаков А.А. Лабораторный практикум по радиотехнике и радиозлектронике. Часть 2. Генерирование и преобразование электрических сигналов. Ош, 1995.
5. Павлов В.Н., Ногин В.Н. Схемотехника аналоговых электронных устройств. Учебник для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001.

ИЗУЧЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Цель работы:

1. Изучение принципов получения импульсных колебаний и физических процессов, протекающих в импульсных генераторах.
2. Изучение схем и работы импульсных генераторов.

Содержание работы:

1. Исследование мультивибратора и блокинг-генератора.
1. Краткие теоретические сведения

В развитии современной электроники большое значение приобретает импульсная техника. Цифровая вычислительная техника, цифровое телевидение, цифровая связь, цифровые фотоаппараты и так далее – вот далеко не полный перечень направлений применения импульсной техники.

Основу цифровой техники составляют прямоугольные импульсы. Генерирование прямоугольных импульсов осуществляется простыми схемами прямоугольных импульсов на различной элементной базе – лампах, транзисторах, логических микросхемах, операционных усилителях и так далее.

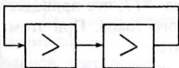


Рис. 1

1. Большое распространение получил простой генератор прямоугольных импульсов - *мультивибратор*. Он представляет собой двухкаскадный усилитель, в котором выход первого каскада связан с входом второго, а выход второго каскада - с входом первого (рис. 1). В схеме имеет место глубокая положительная обратная связь, так как каждый каскад осуществляет сдвиг фазы напряжения на 180° и поэтому входное напряжение каждого транзистора возвращается обратно, после усиления в двух транзисторах, с общим сдвигом 360° . Это – первое условие самовозбуждения автогенератора. Второе условие самовозбуждения – баланс амплитуд - выполняется за счет того,

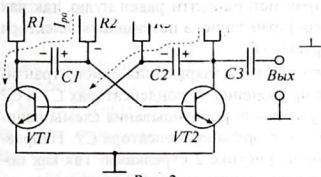


Рис. 2

Все усилители совершенно равноправны и поэтому на принципиальных схемах мультивибраторов усилители изображаются симметричными, с перекрестными связями (рис. 2). Усилители образуют два плеча мультивибратора. Если транзисторы, конденсаторы, резисторы, находящиеся в обоих плечах выбраны совершенно одинаковыми, такой мультивибратор называют симметричным.

Так как обе половины схемы выбраны одинаковыми, естественно предположить, что при включении питания оба транзистора будут открыты, и через них будет протекать одинаковые токи. В начальный момент оба конденсатора -

$C1$ и $C2$ - заряжаются через резисторы $R1$ и $R4$, и токи заряда создают на базах транзисторов положительные напряжения и оба транзистора открыты. Но такое состояние оказывается крайне неустойчивым.

Действительно, пусть вследствие *каких-либо причин* (например, флуктуация тока, тепловое хаотическое движение электронов, естественная радиоактивность и т.п.) обязательно произойдет некоторое увеличение или уменьшение (хотя бы на один электрон!) коллекторного тока одного из транзисторов. Пусть, к примеру, незначительно увеличился ток транзистора $VT1$. При этом на коллекторе транзистора $VT1$ напряжение уменьшится на бесконечно малую величину ΔU_{K1} .

Через конденсатор $C1$ это изменение напряжения мгновенно передается на базу транзистора $VT2$. Так как напряжение на конденсаторе $C1$ не может измениться скачком, то в первый момент напряжение ΔU_{K1} целиком выделится на переходе база-эмиттер транзистора $VT2$, что вызовет уменьшение его базового тока на величину ΔI_{B2} . Уменьшение базового тока второго транзистора вызовет соответственное уменьшение коллекторного тока этого транзистора на величину ΔI_{K2} и увеличение положительного коллекторного напряжения на величину ΔU_{K2} , причем $|\Delta U_{K2}| > |\Delta U_{K1}|$. Через конденсатор $C2$ этот положительный скачок напряжения передается на базу транзистора $VT1$, что приведет к еще большему возрастанию его базового и коллекторного токов. При этом потенциал коллектора транзистора $VT1$ еще более уменьшится.

Так как транзисторы взаимосвязаны, то благодаря их усилительным свойствам процесс увеличения коллекторного тока первого транзистора и уменьшения коллекторного тока второго транзистора происходит лавинообразно и практически мгновенно. В результате первый транзистор оказывается полностью, до насыщения, открытым, а второй - полностью закрытым. С этого момента оба транзистора теряют усилительные свойства. В результате устанавливается, что служит причиной прекращения лавинообразного процесса и схема устанавливается в квазистационарное (временно устойчивое) состояние. При этом потенциал коллектора открытого транзистора почти равен нулю, так как транзистор в этом режиме имеет малое сопротивление, а потенциал коллектора закрытого транзистора приблизительно равен $+E_K$.

За короткое время лавинообразного процесса закрывания одного транзистора и открывания другого транзистора напряжения на конденсаторах $C1$ и $C2$ практически не успевают измениться и уже после опрокидывания схемы начинаются процессы заряда конденсатора $C2$ и разряда конденсатора $C1$. Направления токов для этого момента показаны на рисунке 2 стрелками. Так как потенциал коллектора транзистора $VT2$ высок, конденсатор $C2$ заряжается по цепи: $+E_K - ШВП - R4 - C2 - \text{переход база-эмиттер открытого транзистора } VT1 - ШНП (\text{масса}) - -E_K$. Время заряда конденсатора определяется постоянной времени RC -цепи: $\tau_{зар} = R4 \cdot C2$.

Конденсатор $C1$ разряжается по цепи: $+E_k - ШВП - R2 - C1 - коллектор-эмиттер открытого транзистора VT1 - ШНП - -E_k$. Время разряда конденсатора $\tau_{разр} = R2 \cdot C1$. Ток разряда создает на резисторе $R2$ падение напряжения, полярность которого показана на рисунке 2. Пока течет ток разряда, под действием отрицательного напряжения транзистор $VT2$ закрыт.

По мере разряда конденсатора $C1$ ток разряда через резистор $R2$ уменьшается, напряжение на базе транзистора $VT2$ постепенно повышается и наступает момент, когда он начнет открываться. С этого момента развивается обратный лавинообразный процесс, который заканчивается тем, что транзистор $VT2$ полностью открывается, а $VT1$ — полностью закрывается. Теперь потенциал коллектора первого транзистора высок, а второго — низок, поэтому ранее заряженный конденсатор $C2$ начинает разряжаться по цепи: $+E_k - ШВП - R3 - C2 - коллектор-эмиттер открытого транзистора VT2 - ШНП - -E_k$. В то же время, разряженный конденсатор $C1$ заряжается по цепи: $+E_k - ШВП - R1 - C1 - переход база-эмиттер открытого транзистора VT2 - ШНП - -E_k$.

Пока конденсатор $C2$ не разрядится, до тех пор транзистор $VT1$ остается закрытым и схема находится в квазистационарном состоянии. Как только транзистор $VT1$ начнет открываться, вновь разовьется лавинообразный процесс и мультивибратор перейдет в противоположное состояние.

Выходное напряжение, снимаемое с коллектора любого из транзисторов симметричного мультивибратора представляет собой прямоугольные импульсы равной длительности с резкими скачками от минимального напряжения к максимальному и обратно (рис. 3, а). Если схема несимметрична, то продолжительность положительных и отрицательных импульсов будет неодинаковой (рис. 3, б).

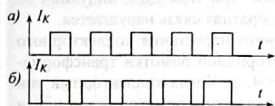


Рис. 3

Период колебаний мультивибратора равен сумме времен разряда конденсаторов $C1$ и $C2$, то есть, $T = 0,7 \cdot (R2 \cdot C1 + R3 \cdot C2)$. Частота колебаний может регулироваться изменением величин емкостей $C1$ и $C2$ и сопротивлений резисторов $R2$ и $R3$.

Плавную регулировку частоты можно, также осуществить подачей регулируемого напряжения на резисторы $R2$ и $R3$. Для этого верхние выводы резисторов $R2$ и $R3$ (см. рис. 2) следует отсоединить от верхней шины « $+E_k$ » и присоединить к регулируемому источнику напряжения. При этом время разряда конденсаторов $C1$ и $C2$ будет зависеть от величины регулируемого напряжения.

Так как напряжение отпириания транзисторов почти не зависит от напряжения источника питания, частота колебаний мультивибратора мало зависит от изменений питающего напряжения.

2. Для получения мощных кратковременных импульсов тока используются **блокинг-генераторы**. Блокинг-генератор представляет собой однокаскадный

релаксационный генератор с сильной индуктивной обратной связью, осуществляемой через специальный (импульсный) трансформатор (рис. 4, а).

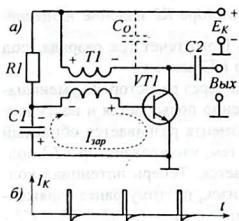


Рис. 4

Обмотки импульсного трансформатора $T1$ включены таким образом, чтобы при увеличении коллекторного тока на базу транзистора подавалось положительное (отпирающее) напряжение, а при уменьшении коллекторного тока, наоборот, отрицательное (запирающее) напряжение.

В момент включения питания транзистор $VT1$ закрыт, конденсатор $C1$ заряжается через резистор $R1$ и, когда напряжение на нем достигнет напряжения отпирания транзистора, возникнет базовый, а вместе с ним, и коллекторный ток. Коллекторный ток возрастает от нуля и поэтому через первичную (коллекторную) обмотку трансформатора $T1$ течет нарастающий коллекторный ток.

Изменение магнитного потока в сердечнике трансформатора наводит э.д.с. индукции во вторичной (базовой) обмотке трансформатора (полярности напряжений в обмотках трансформатора на данный момент показаны на рис. 4, а). Возрастающее напряжение с вторичной обмотки через конденсатор $C1$ прикладывается между базой и эмиттером транзистора, что приводит к увеличению коллекторного тока и, через цепь обратной связи, к еще большему отпиранию транзистора. Таким образом, возникает лавинообразный процесс возрастания коллекторного тока. Однако коллекторный ток не может возрасти неограниченно и, ввиду нелинейности характеристики транзистора, когда коллекторный ток достигает насыщения, становится постоянным, при этом э.д.с. индукции во вторичной обмотке трансформатора исчезает и обратная связь нарушается.

Конденсатор $C1$ в процессе лавинообразного нарастания коллекторного тока заряжается базовым током за счет э.д.с. вторичной обмотки трансформатора по цепи, показанной стрелкой на рисунке 4, а. Когда коллекторный ток достигнет насыщения, э.д.с. во вторичной обмотке трансформатора исчезнет, и базовый ток транзистора начнет уменьшаться. В некоторый момент времени транзистор выйдет из состояния насыщения, транзистор вновь обретет усиленные свойства, и коллекторный ток начнет уменьшаться.

Уменьшение коллекторного тока в первичной обмотке трансформатора вызывает уменьшение магнитного потока в сердечнике и направление э.д.с. во вторичной обмотке изменится на противоположное. Потенциал базы еще более уменьшится, что приведет к уменьшению коллекторного тока. Возникает лавинообразный процесс уменьшения коллекторного и базового тока, который заканчивается тем, что транзистор $VT1$ полностью закрывается.

После этого транзистор продолжительное время остается запираемым отрицательным напряжением заряженного конденсатора $C1$, приложенным к базе через вторичную обмотку трансформатора (полярность напряжения на конденсаторе $C1$ на этот момент показана на рис. 4, а).

Конденсатор не может разрядиться через закрытый эмиттерный $p-n$ -переход транзистора, так как его сопротивление велико. Разряд конденсатора $C1$ происходит по цепи: $+E_K - ШВП - R1 - C1 - ШНП - -E_K$. Время разряда конденсатора зависит от постоянной времени цепочки $RIC1$, то есть, $\tau_{раз} \approx R1 \cdot C1$. По мере разряда конденсатора запирающее напряжение на базе транзистора уменьшается.

Как только запирающее напряжение на конденсаторе снизится настолько, что возникнет базовый ток, транзистор начнет вновь открываться, появится нарастающий коллекторный ток, что вызовет дальнейший рост базового тока. Возникает лавинообразный процесс нарастания коллекторного тока и заряда конденсатора $C1$. Таким образом, в схеме устанавливаются периодические колебания тока, временная характеристика которого показана на рисунке 4, б.

В момент полного запираия транзистора в колебательном контуре, составленном из индуктивности первичной трансформатора, межвитковой емкости, а также паразитной емкости монтажа - C_0 , возникают ненужные затухающие колебания, чем объясняется появление отрицательного «хвоста» выходного импульса коллекторного тока. На рисунке 4, а паразитная монтажная емкость показана пунктиром.

Учитывая, что пауза между импульсами составляет большую часть периода колебаний генератора, можно считать, что период колебаний определяется скоростью разряда конденсатора $C1$, которую можно изменять, регулируя емкость конденсатора $C1$ или величину сопротивления $R1$.

Поскольку частота колебаний релаксационных генераторов нестабильна, на практике для получения стабильной работы отдельного генератора или синхронной работы нескольких генераторов, например в телевидении, применяется синхронизация. Синхронизирующие импульсы подаются на базу транзистора, заставляя его открыться досрочно, не дожидаясь полного разряда конденсатора.

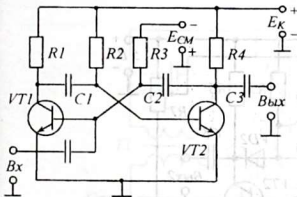


Рис. 5

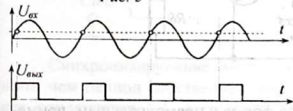


Рис. 6

3. На практике часто возникает необходимость преобразовать импульсы неправильной формы или синусоидальные и -тому подобные сигналы в прямоугольные импульсы. Это осуществляется формирователями импульсов, например, ждущим мультивибратором (рис. 5).

Ждущим мультивибратором называется генератор с двумя состояниями, одно из которых устойчивое (в нем генератор может находиться сколь угодно долго, без постороннего вмешательства), другое - квазистационарное, из которого генератор самостоятельно возвращается в первоначальное, устойчивое состояние. Перевод генератора в квазистационарное состояние происходит при воздействии внешнего, управляющего напряжения.

Ждущий мультивибратор отличается от обычного мультивибратора тем, что один транзистор (в данной схеме транзистор $VT1$) надежно заперт отрицательным напряжением смещения $E_{см}$. Однако при подаче сильного внешнего импульса (произвольной формы), закрытый транзистор может кратковременно открыться и стать причиной лавинообразного нарастания его тока.

При открывании транзистора $VT1$ напряжение на его коллекторе уменьшается. Это уменьшение напряжения через разделительный конденсатор $C1$ мгновенно передается на базу транзистора $VT2$. Его базовый и коллекторный токи уменьшаются, напряжение на коллекторе возрастает. Это возрастание напряжения через конденсатор $C2$ передается на базу транзистора $VT1$ и транзистор $VT1$ еще более открывается.

Лавинообразный процесс открывания транзистора $VT1$ и закрывания транзистора $VT2$ завершается, когда коллекторный ток открытого транзистора $VT1$ насыщается, и напряжение на коллекторе становится постоянным. При этом транзистор $VT2$ начинает открываться и через некоторое время таким же лавинообразным процессом схема возвращается в исходное состояние, в котором она находится до прихода следующего входного импульса.

Зарядившийся конденсатор $C2$ своим напряжением удерживает транзистор $VT1$ в закрытом состоянии, несмотря на то, что входной импульс ещё не закончился.

Ввиду того, что мультивибратор вырабатывает импульс только с приходом запускающего импульса, подобный мультивибратор называется *ждущим*. При подаче серии импульсов, независимо от их формы, на выходе возникает такое же количество, но уже одинаковых прямоугольных импульсов (рис. 6).

2. Схемы исследования

Схема изучения мультивибратора (рис. 7) в отличие от рассмотренной выше (см. рис. 2) отличается тем, что

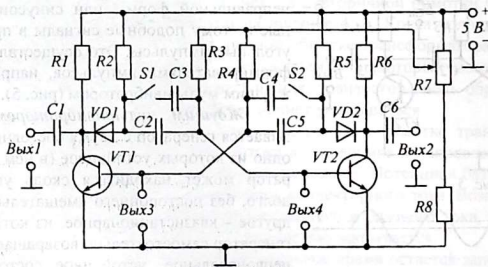


Рис. 7

1. Для получения колебаний, близких по форме к прямоугольным, применены корректирующие диоды $VD1$ и $VD2$. Роль их сводится к тому, чтобы не

допустить тока заряда конденсаторов $C2$ и $C5$ через коллекторные нагрузки $R1$ и $R6$, что способствует сохранению на коллекторах закрытых транзисторов максимального положительного напряжения $+E_k$, то есть, формированию плоской вершины импульсов. Заряд конденсаторов осуществляется через резисторы $R2$ и $R5$.

2. Предусмотрена возможность увеличения емкостей $C2$ и $C5$ параллельным подключением конденсаторов $C3$ и $C4$ с помощью переключателей $S1$ и $S2$. Включение только одного из них делает схему несимметричной.

3. Для обеспечения плавной регулировки частоты колебаний предусмотрена возможность регулирования напряжения, подаваемого на базовые резисторы $R3$ и $R4$, с помощью регулируемого делителя напряжения $R7R8$.

Схема имеет 4 выхода, к которым может быть подключен осциллограф. Контроль изменения базовых напряжений осуществляется на выходах 3 и 4. На эти же выходы, как на входы, можно подавать синхронизирующие импульсы.

Схема исследования блокинг-генератора (рис. 8) содержит две регулировки: переменный резистор $R1$, включенный в базовую цепь, позволяет в определенных пределах регулировать время разряда конденсатора $C2$, тем самым управлять длительностью пауз между импульсами, то есть, частотой колебаний. Резистор $R2$ исключает случайную подачу высокого напряжения E_k на базу. Переменный резистор $R4$ позволяет регулировать время заряда конденсатора $C2$, то есть, управлять длительностью формируемого импульса. Частота колебаний при этом изменяется незначительно.

Диод $VD1$ служит для шунтирования нежелательного колебательного контура, составленного из первичной обмотки трансформатора и паразитной емкости C_0 . При формировании импульса диод закрыт и его большое обратное сопротивление не влияет на работу блокинг-генератора. После запираия транзистора диод открывается, и диод $VD1$ шунтирует колебательный контур и снижает его добротность, тем самым, исключая возможность возникновения паразитных колебаний, влияющих на форму импульсов блокинг-генератора.

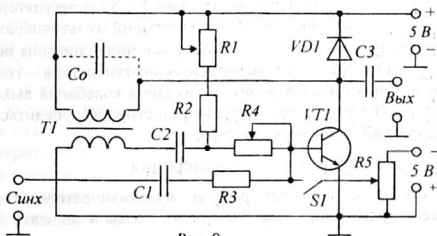


Рис. 8

Синхронизирующие импульсы с периодом следования несколько меньшим, чем период собственных колебаний блокинг-генератора, подаваемые через конденсатор $C1$, открывают транзистор с небольшим опережением (до

окончания разряда конденсатора $C2$). Если частоту синхроимпульсов увеличивать неограниченно, то открывание транзистора начинает происходить через 1, 2, 3... импульса, то есть, происходит *деление частоты* на 2, 3, 4, и т. д. Отрицательным напряжением смещения, подаваемым от другого источника питания, транзистор можно запереть. В этом случае синхронизирующие импульсы могут поступать с любой частотой. Перевод блокинг-генератора в такой ждущий режим осуществляется переключателем $S1$. С помощью потенциометра $R5$ устанавливается запирающее напряжение на базе транзистора $V1$.

Работа ждущего мультивибратора как преобразователя и формирователя прямоугольных импульсов исследуется в лабораторной работе по изучению триггеров.

3. Оборудование и приборы

1. Макет мультивибратора.
2. Макет блокинг-генератора.
3. Генератор синхронизирующих импульсов УЭС-1М.
4. Источник питания ИЭПП-1.
5. Осциллограф ОДШ-2.
6. Частотомер ИЧ-6.
7. Головные телефоны.
8. Соединительные провода и шнуры.

4. Сборка и опробование схем

1. Присоединить макет с мультивибратором к выходу « $0,5 \div 12 В$ » источника питания ИЭПП-1. Переключатель и регулятор выходного напряжения источника поставить в крайнее левое положение. Включить питание и установить выходное напряжение 5 В.

2. К выходу «Вых.2» мультивибратора подключить головные телефоны. Включить питание. Если всё сделано правильно, в телефонах должен быть слышен однотонный звук. Работая переключателями $S1$, $S2$ и регулятором напряжения $R7$, убедиться, что изменяется частота колебаний мультивибратора.

3. Выключить питание. К выходу « $0,5 \div 12 В$ » источника питания подключить макет с блокинг-генератором, а к выходу блокинг-генератора – головные телефоны. После включения питания добиться звучания колебаний выходного напряжения генератора. Изменяя сопротивление резистора $R1$, убедиться в изменении частоты колебаний блокинг-генератора.

5. Эксперименты и измерения

1. Изучить схемы и принцип работы мультивибратора, блокинг-генератора и ждущего мультивибратора. Зарисовать схемы и записать особенности их работы.

2. Установить осциллограф в двухлучевой режим работы (переключатель режима и соответствующие входы - находятся на левой стенке корпуса осциллографа). Входы осциллографа «Вход1» и «Вход2» соединить соответственно с выходами 1 и 2 мультивибратора. Подключить питание мультивибратора к вы-

ходу « $0,5 \div 12$ В» источника ИЭПП-1. Ручку регулятора напряжения источника установить на минимум. Переключатели $S1$ и $S2$ мультивибратора поставить в нижнее положение.

3. Включить приборы. Довести напряжение питания до 5 В. Отрегулировать на экране взаимное положение двух осциллограмм напряжений на коллекторах транзисторов $VT1$ и $VT2$. Полученные осциллограммы зарисовать и объяснить их различие.

4. Перевести один из переключателей $S1$ или $S2$ в верхнее положение и зарисовать форму колебаний несимметричного мультивибратора. Выключить питание.

5. Переключить вход «*Вход1*» осциллографа на выход 3 или 4 мультивибратора, остановив «*Вход2*» подключенным к выходу 2. Включить питание. Зарисовать с экрана осциллограмму изменения базового напряжения. Выключить питание.

6. К выходу 1 мультивибратора, отключив его от осциллографа, подключить частотомер. Изменяя напряжение, подаваемое на делители, с помощью резистора $R7$, и устанавливая максимальную и минимальную емкость конденсаторов, определить максимальную и минимальную частоту мультивибратора. Результаты занести в отчет.

7. Используя тот же выход 1 мультивибратора как вход синхронизации, подключить к нему выход генератора импульсов УЭС-1М. Вначале, включив питание только мультивибратора и осциллографа, добиться на экране осциллографа устойчивого изображения собственных колебаний мультивибратора. После этого включить импульсный генератор и регулируя его частоту, получить на экране осциллограммы напряжений на входе и выходе мультивибратора. Изменяя частоту генератора в сторону увеличения и уменьшения, убедиться в подчинении частоты мультивибратора синхронизирующим импульсам. Аналогично проверить этот факт попыткой регулировки собственной частоты мультивибратора потенциометром $R7$.

8. Выключить питание и вместо мультивибратора подключить блокинг-генератор. Напряжение смещения подать от выхода « $0+40$ В» источника ИЭПП-1, установив регулятор напряжения на минимум. Переключатель $S1$ поставить в положение «выключено». На выход блокинг-генератора подключить один из входов осциллографа. Включив питание, добиться на экране устойчивого изображения колебаний блокинг-генератора. Изменяя сопротивления $R1$ и $R4$, проверить их влияние на частоту колебаний и длительность импульсов. Зарисовать осциллограммы. Выключить приборы.

9. К входу «*Синх*» одновременно подключить импульсный генератор УЭС-1М и другой вход осциллографа. Включив питание приборов, получить на экране две осциллограммы. Добиться синхронизации регулировкой частоты синхроимпульсов. Полученные осциллограммы зарисовать. Проведите интересный опыт: установив частоту блокинг-генератора минимальной и увеличивая частоту синхронизирующих импульсов, наблюдать на экране осциллографа процесс деления частоты колебаний на 2, на 3 и т.д. Одну из осциллограмм зарисовать в тетрадь. Дать объяснения.

10. Установить напряжение смещения -5 В, а движок потенциометра $R5$ поставить на максимум. Переключателем $S1$ перевести блокинг-генератор в ждущий режим. Постепенно уменьшая напряжение смещения (потенциометром $R5$) добиться возобновления колебаний блокинг-генератора. Изменяя в широких пределах частоту синхроимпульсов, убедиться в полном подчинении блокинг-генератора колебаниям задающего генератора.

6. Указания к отчету

Отчет должен содержать следующие материалы:

1. Наименование и цель работы.
2. Принцип работы импульсных генераторов.
3. Схему симметричного мультивибратора. Принцип работы.
4. Схему блокинг-генератора. Принцип работы.
5. Схему ждущего мультивибратора и принцип его работы.
6. Осциллограммы колебаний напряжения симметричного и несимметричного мультивибратора.
7. Осциллограммы колебаний тока блокинг-генератора.
8. Ответы на контрольные вопросы.

7. Вопросы для подготовки

1. Какие генераторы называются импульсными? В чем их отличие от генераторов гармонических колебаний?
2. Как работает мультивибратор?
3. От чего зависит период колебаний мультивибратора?
4. Что такое «ждущий мультивибратор»?
5. В чем отличие схемы ждущего мультивибратора от обычного мультивибратора?
6. Что такое синхронизация и для чего она используется в импульсных генераторах?
7. Какие импульсы тока вырабатывает блокинг-генератор?
8. Как работает блокинг-генератор? От чего зависит период его колебаний?

8. Литература

1. Гершензон Е.М и др. Радиотехника, учеб. пособие для педвузов. – М.: Просвещение, 1986, с. 187-190.
2. Манаев. Е.И. Основы радиоэлектроники. – М.: Радио и связь, 1985, с. 340-347.
3. Молчанов А. П., Занадворов П.Н. Курс электротехники и радиотехники. – М.: Наука, 1976, с. 401-421.

ИЗУЧЕНИЕ АМПЛИТУДНОЙ МОДУЛЯЦИИ

Цель работы:

1. Ознакомиться с принципом и видами модуляции.
2. Научиться вычислять коэффициент модуляции.

Содержание работы:

1. Изучение способов амплитудной модуляции.
2. Исследование схемы базовой модуляции.

1. Краткие теоретические сведения

Модуляцией называется изменение параметров высокочастотных несущих колебаний в соответствии с изменением напряжения низкочастотных модулирующих колебаний. В зависимости от того, на какой параметр высокочастотных колебаний $U(\omega)$ воздействуют модулирующие колебания $U(\Omega)$, различают три основных вида модуляции: амплитудную, частотную, фазовую. В пределах данной работы предлагается изучить амплитудную модуляцию.

Виды модуляции

$$U(\omega) = U_m \cos(\omega t + \varphi)$$

амплитудная частотная фазовая

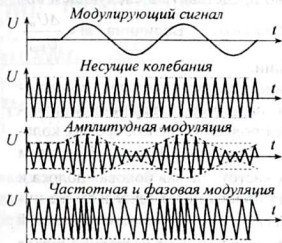


Рис. 1

На рисунке 1 приведены временные характеристики низкочастотного модулирующего сигнала и несущих колебаний высокой частоты, а также временные характеристики модулированных сигналов. Поскольку изменение частоты сигнала равносильно изменению фазы, вид частотно-модулированных и фазомодулированных сигналов совпадает (см. рис. 1).

При амплитудной модуляции амплитуда высокочастотных (несущих) колебаний изменяется по закону модулирующих низкочастотных колебаний. Простой анализ амплитудно-модулированных колебаний, представленных на рисунке 2, показывает нали-

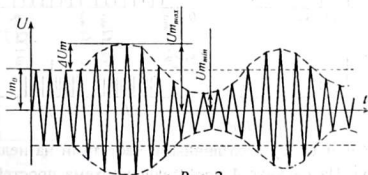


Рис. 2

чие в них колебаний трех частот: ω , $\omega + \Omega$, $\omega - \Omega$. Действительно, в случае тональной (одночастотной) модуляции с частотой $\Omega = const$ амплитуда высоко-

частотных колебаний изменяется по закону: $U_m(t) = U_m + \Delta U_m \cos(\Omega t)$ и амплитудно-модулированный сигнал может быть представлен в виде: $u = (U_m + \Delta U_m \cos \Omega t) \cos \omega t$. При этом мы условно (для простоты) принимаем, что сдвига фазы нет, то есть, $\varphi_1 = 0, \varphi_2 = 0$.

Преобразуем выражение $u = (U_m + \Delta U_m \cos \Omega t) \cos \omega t$:

$$u = U_m \cos \omega t + \Delta U_m \cos \omega t \cos \Omega t = U_m \cos \omega t + \frac{\Delta U_m}{2} \cos(\omega + \Omega)t + \frac{\Delta U_m}{2} \cos(\omega - \Omega)t.$$

Как видно отсюда, модулированное колебание состоит из трех колебаний разных частот: $\omega, \omega + \Omega$ и $\omega - \Omega$.

Спектральная характеристика амплитудно-модулированного сигнала показывает наличие в модулированном сигнале колебаний трех частот (рис. 3, а). Колебания с частотой ω называются несущими колебаниями. Колебания с частотами $\omega + \Omega$ и $\omega - \Omega$ называются боковыми колебаниями. Их амплитуда вдвое меньше амплитуды несущих колебаний. Передаваемая информация связана с боковыми колебаниями, несущие колебания информации не содержат.

Уравнение амплитудной модуляции можно представить в следующем виде: $u = (U_m + \Delta U_m \cos \Omega t) \cdot \cos \omega t = U_m(1 + m \cos \Omega t) \cdot \cos \omega t$. Величина $m = \frac{\Delta U_m}{U_m}$

называется коэффициентом (глубиной) модуляции.

В случае, если модулирующее напряжение несинусоидальное, со сложным спектральным составом, что соответствует, например, телефонному сигналу, то в модулированных колебаниях появляется большое число боковых колебаний с частотами $\omega \pm \Omega_1, \omega \pm \Omega_2, \omega \pm \Omega_3, \dots$ и т. д. (рис. 3, б, в). При этом образуются две симметричные полосы боковых частот – левая боковая полоса и правая боковая полоса, причем, каждая боковая полоса несет одну и ту же информацию. Полоса частот $2\Delta\omega = 2\Omega_{max}$ или $2\Delta f = 2F_{max}$ называется шириной канала радиосвязи. На рисунке 3, г показано расположение на частотной шкале двух радиостанций с несущими частотами f_1 и f_2 .

Амплитудная модуляция осуществляется одновременным воздействием

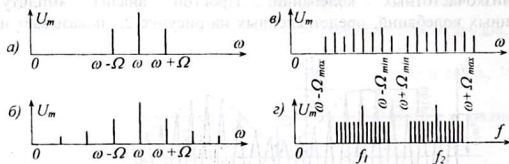


Рис. 3

двух напряжений $U(\omega)$ и $U(\Omega)$ с различными частотами на нелинейный элемент, например, диод. На рисунке 4 представлена схема простейшего амплитудного модулятора на полупроводниковом диоде. Здесь резистор $R1$ является нагрузкой модулятора, а конденсатор $C1$ – выполняет роль разделительного

конденсатора, чтобы не пропустить на выход постоянную составляющую тока диода.

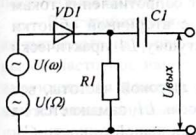


Рис. 4

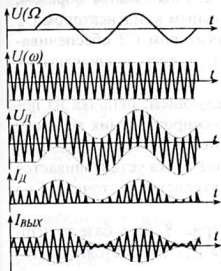


Рис. 5

Пусть сигналы $U(\omega)$ и $U(\Omega)$ представляют собой гармонические колебания с частотами ω и Ω . Ввиду нелинейности вольтамперной характеристики диода на нагрузке модулятора создаются сигналы всевозможных комбинационных частот: $|k\omega \pm n\Omega|$, где $k = 0, 1, 2, \dots$, $n = 0, 1, 2, \dots$. Поскольку модулированный сигнал должен содержать только колебания с частотами ω , $\omega + \Omega$; $\omega - \Omega$, для их выделения на выходе модулятора должен быть включен полосовой фильтр. В качестве такого фильтра обычно применяют колебательный контур, настроенный на частоту ω , с полосой пропускания $2\Delta\omega = 2\Omega_{\text{макс}}$.

Работа диодного модулятора может быть представлена временными характеристиками сигналов на входах и выходе схемы (рис. 5).

Наибольшее распространение в диапазоне радиочастот получили устройства модуляции с транзисторами и электронными лампами. В транзисторных устройствах напряжение несущих высокочастотных колебаний, как правило, подводится к базе транзистора, модулирующее напряжение — к базе, коллектору или к эмиттеру. В зависимости от способа подачи модулирующего напряжения различают схемы базовой модуляции и коллекторной модуляции.

Рассмотрим схему базовой модуляции (рис. 6). Она представляет собой разновидность резонансного усилителя с контуром $L2C4$ в коллекторной цепи.

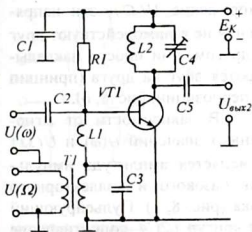


Рис. 6

Контур играет роль фильтра для выделения модулированных колебаний, то есть, колебаний несущей частоты и боковых составляющих. Контур настраивается на частоту несущих колебаний $\omega_0 = \omega$ и полоса пропускания его должна быть достаточной для выделения колебаний с боковыми частотами $\omega + \Omega$, $\omega - \Omega$ (рис. 7). Полоса пропускания $2\Delta\omega$ не должна быть уже, чем 2Ω , то есть $2\Delta\omega \geq 2\Omega_{\text{макс}}$. Добротность контура при этом

$$\text{равна: } Q = \frac{\omega}{2\Omega_{\text{макс}}}$$

К базе транзистора одновременно подводятся: напряжение высокой частоты $U(\omega)$, и модулирующее напряжение низкой частоты $U(\Omega)$. Высокочас-

тотное напряжение подается на базу через разделительный конденсатор $C2$, а низкочастотное – через трансформатор $T1$. Катушка $L1$ – небольшой индуктивности, называемая дросселем, практически не оказывает сопротивления токам низкой частоты. Поэтому низкочастотное напряжение с вторичной обмотки трансформатора подается на базу транзистора через катушку $L1$ практически без ослабления.

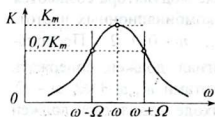


Рис. 7

Незначительный ток высокой частоты, все же прошедший через дроссель $L1$, замыкается на массу через конденсатор небольшой емкости $C3$, который для низкочастотного тока представляет собой огромное сопротивление. Таким образом, дроссель $L1$ с разделительным конденсатором $C2$ и шунтирующим конденсатором $C3$ обеспечивают

развязку входных устройств с разными частотами, то есть, исключают их взаимное влияние.

Принцип базовой модуляции заключается в следующем: цепочка из последовательно включенных, резистора $R1$ и активного сопротивления дросселя $L1$ и вторичной обмотки трансформатора $T1$, устанавливает начальный базовый ток транзистора едва отличным от нуля, то есть, рабочая точка устанавливается в точке открывания транзистора (начало входной характеристики – точка PT на рис 8, а).

Пусть в течение промежутка времени от 0 до t_1 (рис. 8, б) к базе транзистора подводится только напряжение высокой частоты $U(\omega)$ с постоянной амплитудой U_m . Ток базы I_b появляется только в тех случаях, когда напряжение между базой и эмиттером превысит напряжение, соответствующее точке PT . Поэтому базовый ток, а, следовательно, и коллекторный ток имеют форму импульсов постоянной амплитуды.

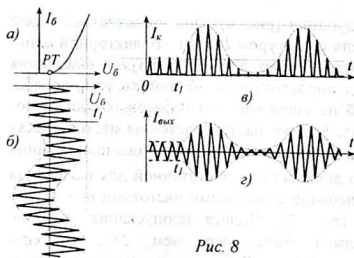


Рис. 8

Если на базу транзистора, начиная с момента t_1 , подать и модулирующее низкочастотное напряжение $U(\Omega)$, эти напряжения не взаимодействуют друг с другом, они просто накладываются друг на друга (принцип суперпозиции, рис. 8, б).

В зависимости от мгновенных значений $U(\omega)$ и $U(\Omega)$ изменяется амплитуда импульсов базового и коллекторного тока (рис. 8, в). Пульсирующий коллекторный ток протекает через параллельный контур $L2C4$, сопротивление которого переменному току в интервале частот $(\omega - \Omega) \div (\omega + \Omega)$ максимально.

Для постоянной составляющей и более высоких гармоник коллекторного тока сопротивление контура невелико и поэтому падение напряжения на конту-

ре, создаваемое этими составляющими, можно не учитывать. Выделенные фильтром (контуром $L2C4$) колебания с частотами $\omega - \Omega$, ω , $\omega + \Omega$ (рис. 8, з) подаются на выход через разделительный конденсатор $C5$.

В устройствах коллекторной модуляции подача высокочастотного и низкочастотного напряжений осуществляется на разные электроды транзистора: высокочастотное напряжение $U(\omega)$ подается на базу, а низкочастотное (модулирующее) напряжение $U(\Omega)$ - на коллектор. При этом входные цепи оказываются независимыми и не влияют друг на друга. Однако для эффективной модуляции сигнал $U(\Omega)$ предварительно должен быть усилен до значений нескольких единиц или десятков вольт. При этом амплитуда импульсов коллекторного тока зависит одновременно от тока базы I_b и от напряжения коллектора, то есть, от $U(\Omega)$.

2. Схема исследования

Изучение процессов амплитудной модуляции производится на установке базовой модуляции (рис. 9). Модулятор построен на транзисторе $VT1$. Напряжения высокой и низкой частоты подаются на базу транзистора через разделительные конденсаторы $C1$, $C2$. Регулировка амплитуды подаваемых напряжений осуществляется потенциометрами $R2$ и $R3$. Высокочастотные токи, протекающие через резистор $R2$, замыкаются через шунтирующий конденсатор $C3$ небольшой емкости, минуя резистор $R3$, то есть, не попадают на низкочастотный вход «Вх.2». Разделительный конденсатор $C1$, в свою очередь не пропускает низкочастотные токи на высокочастотный вход «Вх.1». Это объясняется небольшой емкостью конденсатора $C1$.

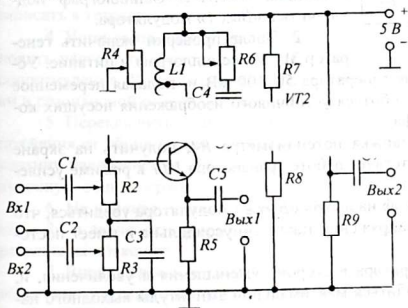


Рис. 9

осуществляется потенциометром $R4$. В коллекторной цепи транзистора $VT1$ включен фильтр - колебательный контур $L1C4$, настроенный на частоту несущих колебаний. Изменяя с помощью резистора $R6$ активное сопротивление контура, можно управлять величиной добротности контура Q , а, следовательно, и полосой пропускания контура. Известно, что чем больше активное сопротивление контура, тем меньше его добротность и шире полоса пропускания.

Резисторы $R4$, $R1$, $R2$, $R3$ образуют делитель напряжения, позволяющий установить рабочую точку транзистора в режиме насыщения в процессе А

осуществляется потенциометром $R4$.

В коллекторной цепи транзистора $VT1$ включен фильтр - колебательный контур $L1C4$, настроенный на частоту несущих колебаний. Из-

Выделенное контуром, модулированное напряжение, поступает на базу транзистора *VT2*, включенного по схеме эмиттерного повторителя. Контроль выходного сигнала осуществляется на выходе «*Вых.2*», куда подключается осциллограф или анализатор спектра. Выход «*Вых.1*» предназначен для контроля работы первого транзистора в режиме усиления или модуляции.

3. Оборудование и приборы

Для выполнения работы используются следующие приборы и материалы:

1. Макет установки амплитудной модуляции.
2. Источник питания ИЭПП-1
3. Генератор звуковой частоты ЗГ-2А.
4. Генератор звуковой частоты ГЗШ-63.
5. Осциллограф С1-1 или С1-83.
6. Соединительные провода и шнуры.

4. Сборка и опробование схемы

1. Собрать схему для исследования процесса амплитудной модуляции согласно рис. 10. Выход генератора ЗГ-2А соединить с входом «*Вх.1*». Переключатели выхода генератора установить в положения «*мВ*» и «*200*», при этом выходное напряжение генератора может регулироваться в пределах $0 \div 200$ мВ.

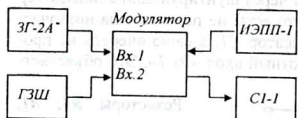


Рис. 10

Выход «*5 Ом*» школьного генератора ГЗШ-63 соединить с входом «*Вх.2*» модулятора. Постоянное напряжение питания 5 В подается с выхода «*0,5 ÷ 12 В*» источника ИЭПП-1. Осциллограф подключить к «*Вых.1*» модулятора.

2. После проверки включить генератор ЗГ-2А, осциллограф и питание. Установить выходное напряжение генератора $50 \div 100$ мВ и, подавая переменное напряжение частотой 10 кГц, добиться устойчивого изображения несущих колебаний на экране осциллографа.

3. Изменяя положение движка потенциометра *R4*, получить на экране полную синусоиду, что соответствует работе транзистора *VT1* в режиме усиления класса А.

4. Переключив осциллограф на выход «*Вых.2*» модулятора убедиться, что форма колебаний выходного напряжения также синусоидальна и имеет постоянную амплитуду.

5. Изменяя частоту генератора в сторону уменьшения и увеличения, и, наблюдая по осциллографу, добиться максимальной амплитуды выходного напряжения модулятора. Этот момент соответствует совпадению частоты генератора с собственной частотой контура *L1C4*. Для повышения остроты резонанса сопротивление контура довести до минимума, вращая ручку потенциометра *R6* влево.

6. Вновь переключить осциллограф на выход «*Вых.1*» модулятора и потенциометром *R4* перевести схему в режим модуляции, то есть, с отсечкой по-

луволи коллекторного тока. Это соответствует режиму работы транзистора в классе усиления В.

7. Переключив осциллограф на выход «Вых. 2», включить второй генератор и установить его выходное напряжение таким, чтобы получить на экране осциллографа изображение модулированных колебаний с небольшой глубиной модуляции, частоту модулирующего напряжения выбрать равным 200-300 Гц. При этом необходимо расширить полосу пропускания контура, увеличив его активное сопротивление потенциометром R_6 . Выключить схему. Регулировку частоты первого генератора больше не трогать.

5. Эксперименты и измерения

1. Зарисовать схему модулятора с базовой модуляцией. Изучить принцип работы. Записать особенности и назначение элементов схемы.

2. Включить собранную схему исследования базового модулятора. Подавая напряжение только от первого генератора, получить на экране осциллографа устойчивое изображение синусоиды. При этом осциллограф должен быть подключен к выходу «Вых. 1». Если колебания не синусоидальные, вращая ручку потенциометра R_4 влево, перевести работу транзистора $VT1$ в режим усиления класса А. Переключить осциллограф на выход «Вых. 2».

3. Определить частоту, на которую настроен колебательный контур $L1C4$, а также его полосу пропускания для минимального и максимального значения активного сопротивления контура, то есть, резистора R_6 . Для этого изменять частоту генератора влево и вправо, пока выходное напряжение модулятора («Вых. 2») не уменьшится до значения 0,7 максимального, (оценка величин амплитуд производится по сетке, нанесенной на экране осциллографа). Данные записать в тетрадь.

4. Установить полосу пропускания контура $2\Delta f = 600$ Гц. Для этого установить частоту генератора на 300 Гц ниже или выше резонансной и, изменяя сопротивление R_6 , добиться, чтобы амплитуды колебаний на частоте расстройки и резонансной относились как 7:10.

5. Переключить осциллограф на выход «Вых. 1» модулятора. Подавая напряжения от обоих генераторов, получить на экране осциллографа устойчивую картину наложения колебаний, иллюстрирующую принцип суперпозиции. Полученную осциллограмму зарисовать.

6. Не изменяя установленных регулировок; переключить осциллограф на «Вых. 2» и зарисовать форму колебаний выходного напряжения. Полученные результаты объяснить.

7. Вновь переключить осциллограф на выход модулятора «Вых. 1» и перевести схему в режим модуляции (резистором R_4). Зарисовать форму импульсов коллекторного тока, полученных на экране осциллографа. Результат объяснить.

8. Включить осциллограф на выход «Вых. 2» и зарисовать осциллограмму модулированных колебаний. Установить глубину модуляции порядка 30-40%, зарисовать осциллограмму и записать максимальный и минимальный размах колебаний, то есть, отклонений $2U_{\max}$ и $2U_{\min}$.

9. По полученным данным вычислить коэффициент модуляции по формуле $m = \frac{2U_{\text{макс}} - 2U_{\text{мин}}}{2U_{\text{макс}} + 2U_{\text{мин}}} \cdot 100\%$.

10. Выключить приборы. Разобрать схему.

6. Указания к отчету

Отчет должен содержать следующие материалы:

1. Наименование и цель работы.
2. Определения процессов модуляции и детектирования.
3. Схему базовой амплитудной модуляции.
4. Числовые данные настройки контура и его полоса пропускания при максимальной и минимальной добротности, оптимальный коэффициент модуляции, амплитуды выходных напряжений диодных детекторов.
5. Осциллограммы коллекторного тока и выходного напряжения модулятора в режиме усиления и в режиме модуляции.
6. Осциллограммы процессов модуляции в диодном модуляторе (рис. 5).
7. Ответы на контрольные вопросы.

7. Вопросы для подготовки

1. Что называется модуляцией?
2. Почему модуляция возможна только на нелинейных элементах?
3. Как называются основные виды модуляции? Укажите их особенности.
4. Каков спектральный состав амплитудно-модулированных колебаний?
5. Что называется коэффициентом модуляции и как он вычисляется?
6. Для чего нужны фильтры в цепях модуляторов?

8. Литература

1. Гершензон Е.М. и др. Радиотехника. Учеб. пособие для педвузов - М.: Просвещение, 1986, с 192-198, 200-205.
2. Манаев Е.И. Основы радиоэлектроники. - М.: Радиосвязь, 1985, с. 383-386, 396-400.

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ

Цель
работы:

1. Знакомство с принципами детектирования амплитудно-модулированных сигналов.
2. Изучение конкретных схем амплитудных детекторов.

Содержание
работы:

1. Исследование диодных и транзисторных амплитудных детекторов.

1. Краткие теоретические сведения

Детектированием называется процесс получения из высокочастотных модулированных колебаний сигнала низкой частоты, соответствующего модулирующему сигналу. Детектирование – это процесс, обратный модуляции и его часто называют *демодуляцией*. Детектирование, как и модуляция, сопровождается преобразованием частоты и поэтому детектирование осуществляется только на нелинейных элементах (диодах, транзисторах и т. д.). В соответствии с видом модуляции детекторы делятся на амплитудные, частотные и фазовые детекторы. В данной работе предлагается ознакомиться с устройством и работой амплитудных детекторов.

Детектор обязательно содержит нелинейный элемент, преобразующий спектр частот модулированного сигнала, и частотный фильтр, выделяющий низкочастотные составляющие преобразованного сигнала. На рисунке 1 представлена схема простейшего диодного детектора с открытым входом. Он содержит только три элемента: один нелинейный элемент (полупроводниковый диод $VD1$) и два линейных элемента (конденсатор $C1$ и резистор $R1$), образующие фильтр нижних частот. В данном детекторе диод включен последовательно

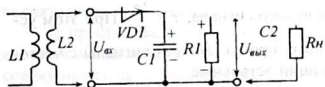


Рис. 1

является *последовательным диодным детектором*. ния $U = (U_m + \Delta U_m) \cos(\omega t + \theta)$ нелинейный элемент, в выходном токе, появляются токи различных комбинационных частот $\omega = k\omega \pm n\Omega$, где $k = 0, 1, 2, \dots, n = 0, 1, 2, \dots$. Эти составляющие преобразованного сигнала можно разделить на три группы:

- 1) *постоянная составляющая* I_0 с частотой $\omega = 0$;
- 2) *высокочастотные составляющие* $i(\omega)$ с частотами $\omega = k\omega \pm n\Omega$, где $k \neq 0$;
- 3) *низкочастотные составляющие*, куда входят модулирующий сигнал с частотой Ω и помеха I_{Π} (гармоники с частотами $n\Omega$, где $n = 2, 3, \dots$).

Совершенно очевидно, что извлечение модулирующего сигнала $U(\Omega)$ из всего спектра колебаний разных частот связано с необходимостью включения соответствующего частотного фильтра, пропускающего только колебания с

частотами $0 \dots \Omega_{max}$. Им обычно служит фильтр низших частот, аналогичный сглаживающему фильтру, используемому в схемах выпрямителей.

Постоянная времени этого RC -фильтра $\tau = RI \cdot CI$ берется сравнимой с периодом колебаний модулирующего сигнала, $\tau \geq \frac{2\pi}{\Omega}$, но, в то же время, обязательно, чтобы постоянная времени RC -фильтра была во много раз больше периода высокочастотных, несущих колебаний, то есть, $\tau \gg \frac{2\pi}{\omega}$, что и соблюдается на практике, где $\omega \gg \Omega$.



Рис. 2

На рисунке 2 приведена графическая интерпретация работы диода в схеме детектора. Если сравнить её с графической интерпретацией работы модулятора, можно заключить, что принципы работы модулятора и детектора практически совпадают. В левой верхней части рисунка изображена вольтамперная характеристика диода. Ниже, в повернутом на 90° виде, показана временная характеристика входного напряжения, а справа – график тока через диод. Как видно из рисунка, закон изменения огибающей кривой модулированных колебаний в выходном токе диода сохраняется (пунктирная линия). Однако спектральный состав пульсирующего тока диода отличается наличием трёх спектральных составляющих (высокочастотных, низкочастотных и постоянной). Среди большого числа составляющих полезным является модулирующий сигнал с частотой Ω .

Главная роль в выделении и восстановлении модулирующего сигнала принадлежит конденсатору CI , называемому блокировочным. Емкость его выбирается из расчета, чтобы постоянная времени цепочки $RICI$ ($\tau = RI \cdot CI$) была сравнима с периодом колебаний модулирующего сигнала, $\tau \geq \frac{2\pi}{\Omega}$. При этом условии цепочка $RICI$ превращается в фильтр, пропускающий сигналы с частотами от $\Omega = 0$ до $\Omega = \Omega_{max}$ и не пропускающий остальные.

Модулированное высокочастотное напряжение, приложенное к диоду, вызывает через него пульсирующий ток одного направления (рис. 3, а). Механизм восстановления модулирующего напряжения из последовательности импульсов можно объяснить следующим образом:

Положительная полуволна входного тока протекает через диод и конденсатор CI , заряжая его. В следующий полупериод ток через диод отсутствует, и конденсатор разряжается через резистор RI . Причем, к моменту прихода следующего импульса конденсатор CI не успевает полностью разрядиться и поэтому изменение напряжения на обкладках конденсатора описывается ломаной

кривой (рис. 3, б). При высокой частоте следования импульсов эти «зубцы» малозаметны, и кривую можно приближенно считать плавной (рис. 3, в).

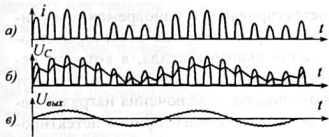


Рис. 3

которое смещает рабочую точку диода влево (см. полярность напряжений на конденсаторе $C1$ и резисторе $R1$ на рисунке 1), и поэтому при слабых сигналах ток через диод вообще отсутствует, то есть, они не детектируются. Кроме того, при напряжениях сигнала $U(\omega) = 0,2 \div 0,5$ В, детектирование происходит на криволинейном участке характеристики диода, что приводит к появлению нелинейных искажений, и поэтому диодные детекторы пригодны для детектирования только сильных сигналов с амплитудой порядка 1 В.

Другой разновидностью диодного детектора является **параллельный диодный детектор**, с закрытым входом (рис. 4).

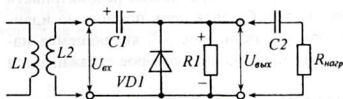


Рис. 4

При этом конденсатор $C1$ заряжается импульсом тока. В следующий полупериод, когда диод закрыт, конденсатор $C1$ разряжается через резистор $R1$ и входное устройство ($L2$). А так как входное устройство имеет небольшое сопротивление (обычно это катушка контура), то напряжение конденсатора целиком приложено к резистору $R1$. Конденсатор $C2$ препятствует проникновению постоянной составляющей на выход детектора.

В простых радиоприемниках часто применяют **диодный детектор с удвоением напряжения** (рис. 5). Как видно из рисунка, он представляет собой совокупность двух диодных детекторов – параллельного – $VD1C1$ и последовательного $VD2C2$. Причем, оба детектора работают на одну нагрузку – $R1$.

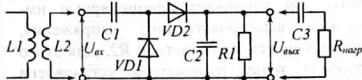


Рис. 5

В следующий (положительный) полупериод оказывается открытым диод $VD2$ и конденсатор $C2$ заряжается от суммы двух напряжений, напряжения сигнала и напряжения конденсатора $C1$: $U_{\text{вых}} + U_{C1} \approx 2U_m$. Таким образом, на

Конденсатор $C2$ - разделительный, он пропускает на выходную нагрузку R_H только низкочастотный, протектированный, сигнал.

Недостатком диодных детекторов является то, что ток разряда конденсатора $C1$ создает на резисторе $R1$ запирающее напряжение U_{CM} ,

входом (рис. 4). Принцип работы этого детектора мало, чем отличается от работы рассмотренного выше последовательного детектора. Ток через диод протекает только при поступлении отрица-

В отрицательный полупериод входного напряжения конденсатор $C1$ заряжается через диод $VD1$ до напряжения, практически равного амплитудному значению, то есть, $U_{C1} \approx U_m$.

конденсаторе $C2$ напряжение оказывается в два раза больше, чем у последовательного или параллельного детектора и поэтому данный детектор как бы удваивает выходное напряжение детектора.

Детектирование слабых сигналов (детектирование с одновременным усилением) можно осуществить на транзисторах. Транзисторные детекторы строятся на основе обычного резисторного усилительного каскада, в котором используется нелинейная зависимость тока базы или тока коллектора от напряжения база-эмиттер. В зависимости от способа подключения нагрузки детектора к транзистору различают схемы базового и коллекторного детектирования.

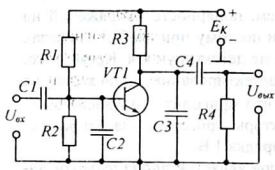


Рис. 6

точно параллельному диодному детектору. На резисторе $R2$, являющемся нагрузкой детектора, создается пульсирующее напряжение, которое сглаживается конденсатором $C2$.

Под воздействием амплитудно-модулированного напряжения на резисторе $R2$ возникает переменная составляющая напряжения низкой частоты. Это напряжение усиливается транзисторным усилителем (транзистор $VT1$). Так как часть высокочастотной составляющей из эмиттерно-базовой цепи все же проникает в коллекторную цепь, она замыкается на массу через конденсатор $C3$ небольшой емкости. Низкочастотное напряжение с резистора $R3$ на выход подается через разделительный конденсатор $C4$.

Коллекторный детектор (рис. 7) отличается от базового детектора тем, что транзистор работает не как усилитель низкой частоты, а как усилитель высокой частоты. Он усиливает однополярные импульсы высокочастотного напряжения, образующиеся на резисторе $R2$. Для этого рабочая точка транзистора установлена

делителем $R1R2$ в начале входной характеристики (на нижнем изгибе). Поэтому положительные и отрицательные полуволны входного напряжения усиливаются неодинаково.

Восстановление низкочастотного модулирующего сигнала происходит в коллекторной цепи, где цепочка $R3C3$ играет роль фильтра низких частот. На

В базовом детекторе (рис. 6) с помощью делителя $R1R2$ на базу транзистора $VT1$ подается постоянное напряжение, устанавливающее рабочую точку транзистора на начало входной характеристики. При подаче на вход переменного напряжения $U(\omega)$ в цепи базы появляются импульсы тока, подобно импульсам тока диода (см. рис. 3, а). При этом $p-n$ -переход база-эмиттер транзистора можно рассматривать как диод, и базовая цепь полностью идентична

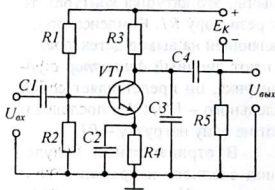


Рис. 7

конденсаторе $C3$ появляется низкочастотное напряжение $U(\Omega)$, которое через разделительный конденсатор $C4$ подается на выход детектора. Цепочка $RC2$ служит для температурной стабилизации работы транзистора и, главным образом, с целью увеличения входного сопротивления детектора - $R2$.

Транзисторные детекторы обладают большей чувствительностью по сравнению с диодными, однако вносят значительные нелинейные искажения, поэтому в промышленных приемниках, как правило, применяются диодные детекторы, на которые подается, предварительно усиленное до $0,5 \div 1$ В, модулированное напряжение.

2. Схемы исследования

Для исследования процессов детектирования используется макет амплитудного модулятора, который служит источником модулированного сигнала. Макет состоит из двух генераторов высокой и низкой частоты, а также диодно-го преобразователя. Генератор высокой частоты вырабатывает колебания с частотой 20 кГц, которые служат несущими колебаниями. Генератор низкой частоты вырабатывает модулирующие колебания с частотой 200 Гц.

Схемы исследования диодных и транзисторных детекторов соответствуют схемам, представленным на рис. 1, 4, 5, 6, 7. В схеме параллельного детектора (рис. 4) предусмотрены гнезда для подключения осциллографа с целью контроля прохождения и преобразования сигнала в детекторе.

3. Оборудование и приборы

Для выполнения работы используются:

1. Макет установки амплитудной модуляции.
2. Макет с диодными детекторами.
3. Макет с транзисторными детекторами.
4. Источник питания ИЭПП-1.

4. Соединение

1. Собрать схему для исследования процесса детектирования согласно рис. 8. В качестве детектора взять последовательный детектор (см. рис. 1). Выход модулятора соединить с входом детектора. Одновременно выход модулятора соединить с входом «У-У» осциллографа. На модулятор подать постоянное напряжение питания 5 В от источника ИЭПП-1. Если используется транзисторный детектор, он также питается от этого же источника.

2. После проверки включить питание и осциллограф. Добиться устойчивого изображения модулированных колебаний на экране осциллографа.

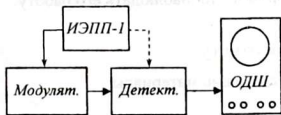


Рис. 8

3. Переключить осциллограф на выход детектора и наблюдать осциллограмму протектированного сигнала.

5. Эксперименты и измерения

1. Зарисовать схемы последовательного и параллельного диодных детекторов. Изучить принцип их работы. Записать особенности и назначение элементов схемы последовательного детектора.

2. Подключить вход осциллографа к выходу модулятора. Включить собранную схему исследования. Получить на экране устойчивую осциллограмму модулированных колебаний. Полученную осциллограмму модулированного сигнала зарисовать, записать максимальную и минимальные амплитуды несущих колебаний.

3. Переключить осциллограф к выходу детектора. Получить осциллограмму напряжения протектированных колебаний детектора. Установить амплитуду колебаний примерно на 2-3 деления шкалы. Записать в тетрадь значение амплитуды сигнала. Зарисовать в тетрадь осциллограмму протектированного сигнала.

4. Не меняя регулировки осциллографа, на место последовательного детектора подключить параллельный детектор. Убедиться в его работоспособности. Записать амплитуду протектированного сигнала.

5. Так же, не меняя регулировок, заменить параллельный детектор детектором с удвоением напряжения. Убедиться в его работе. Записать амплитуду выходного сигнала. Сопоставить амплитуды выходных напряжений диодных детекторов и сделать выводы.

6. Прodelать следующий опыт: растягивая изображение по горизонтали (ручкой «Усиление X» осциллографа), убедиться в том, что протектированный сигнал представляет собой ломанную кривую, состоящую из коротких отрезков заряда и разряда конденсатора (см. рис. 3, в). По окончании опыта вернуть изображение в первоначальное состояние.

7. Выключить питание модулятора. Подключить к выходу детектора осциллограф и, подав питание, наблюдать на экране изображение протектированного сигнала.

8. Изменяя глубину модуляции увеличением выходного напряжения генератора низкой частоты, наблюдать на экране осциллографа появление нелинейных искажений протектированного сигнала.

9. Заменить базовый детектор коллекторным. Пронаблюдать его работу.

10. Выключить приборы. Разобрать схему.

6. Указания к отчету

Отчет должен содержать следующие материалы:

1. Наименование и цель работы.
2. Определения процессов модуляции и детектирования.
3. Схемы диодных и транзисторных детекторов.
4. Амплитуды выходных напряжений диодных детекторов.

5. Осциллограммы модулированного и протестированного сигналов.
6. Осциллограммы процессов детектирования в диодном детекторе (рис. 3).
7. Ответы на контрольные вопросы.

7. Контрольные вопросы

1. Что такое модуляция и детектирование?
2. Почему детектирование возможно только на нелинейных элементах?
3. Каков спектральный состав пульсирующего тока диода в детекторе?
4. Перечислите виды амплитудных детекторов и их особенности.
5. Для чего нужны фильтры в цепях детекторов?
6. Почему диодный детектор не детектирует слабые сигналы?
7. В чём разница между параллельным и последовательным диодным детектором?
8. Что представляет собой детектор с удвоением напряжения?
9. В чём преимущества транзисторных детекторов?

8. Литература

1. Гершензон Е.М. и др. Радиотехника. Учеб. пособие для педвузов - М.: Просвещение, 1986, с 192-198, 200-205.
2. Манаев Е.И. Основы радиозлектроники. – М.: Радиосвязь, 1985, с. 383-386, 396-400.

ИЗУЧЕНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН
ВДОЛЬ ДЛИННОЙ ЛИНИИ

*Цель
работы:*

1. Изучить механизм распространения электромагнитных волн вдоль длинной линии.
2. Познакомиться со свойствами четвертьволновых отрезков линий.

*Содержание
работы:*

1. Измерение частоты генератора и длины распространяющейся электромагнитной волны.
2. опыты с четвертьволновыми отрезками линий.

1. Краткие теоретические сведения

Известно, что энергия высокочастотных электрических колебаний, излучаемая антенной, распространяется в пространстве в виде электромагнитных волн. В изотропной среде они распространяются прямолинейно с неизменной скоростью, определяемой параметрами среды: $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \epsilon_0 \mu \mu_0}}$

Для узконаправленной передачи энергии радиоволн используются фидеры (длинные линии) (рис. 1). *Длинной линией* называется линия, состоящая из двух проводников, длина которой соизмерима с длиной распространяющихся в ней волн тока и напряжения.

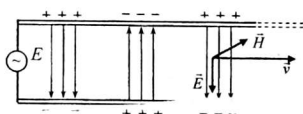


Рис. 1

Энергия волны, излученной генератором, сосредоточена в электрическом и магнитном полях, и передача ее связана с распространением этих полей в виде электромагнитных волн. На основании рассуждения с помощью векторов электрической и магнитной напряженностей полей, создаваемых симметричными участками линии вблизи и вдали от линии (рис. 2), убеждают в отсутствии излучения линией электромагнитных волн, так как на значительных удалениях векторы электрической и магнитной напряженностей, создаваемые симметричными участками линии, взаимно компенсируют друг друга. Из этого можно заключить, что вся энергия распространяющихся вдоль линии волн сосредоточена в ограниченном пространстве, окружающем провода линии. Поэтому провода линии следует рассматривать не просто как проводники электрического тока, но как систему для направленного распространения электромагнитных волн (волновод).

Механизм передачи энергии вдоль линии легко понять, если представить электромагнитную волну как совокупность вихревых электрических и магнитных полей. Из курса физики известно, что вихревое магнитное поле создает вихревое электрическое поле, а оно в свою очередь, создает вихревое магнитное и так далее (рис. 3).

На практике обычно эти волны рассматривают просто как волны тока и напряжения и описывают их отдельными уравнениями, учитывающими, удаленность данного участка линии от генератора. Так как напряжение на зажимах генератора непрерывно меняется, то напряжение, которое было на генераторе раньше, успеет к данному моменту распространиться на большее расстояние, чем напряжение, возникшее позже. Поэтому напряжение между проводами на

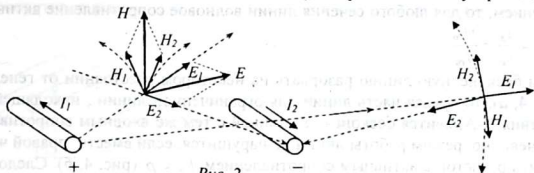


Рис. 2

различных участках линии с некоторым запозданием повторяет мгновенные значения напряжения, которые были до этого на зажимах генератора.

Такое распределение напряжения перемещается вдоль линии. То же происходит и с распределением токов. Таким образом, в каждом сечении линии повторяются те же значения тока и напряжения, что и на зажимах генератора. Если, например, на зажимах генератора напряжение и ток изменяются по закону $u = U_m \cos \omega t$ и $i = I_m \cos \omega t$, то на расстоянии x от генератора колебания тока и напряжения будут запаздывать на время Δt , то есть, $u_x = U_m \cos \omega(t + \Delta t)$.

$i_x = I_m \cos \omega(t + \Delta t)$. Время запаздывания определяется по формуле $\Delta t = \frac{x}{g}$, где g — скорость распространения волны вдоль линии.

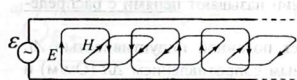


Рис. 3

Если выразить скорость как $g = \frac{\lambda}{T}$, тогда

можно записать: $\Delta t = \frac{x}{\lambda} T$, но, с другой стороны, период можно выразить через

частоту: $T = \frac{1}{\nu} = \frac{2\pi}{\omega}$. В этом случае

$$\Delta t = \frac{x}{\lambda} T = \frac{x}{\lambda} \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi x}{\lambda \omega}$$

После

подстановки

получим:

$$u_x = U_m \cos(\omega t + \omega \Delta t) = U_m \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{\lambda} x\right), \quad i_x = I_m \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{\lambda} x\right).$$

Как видно отсюда, запаздывание изменений тока и напряжения на участках линии зависит только от удаленности данного участка от зажимов генератора. Распространение тока и напряжения, при котором в каждом сечении линии повторяются ток и напряжение, действующие на входе линии, называют бегущими волнами. Очевидно, что бегущие волны возможны в однородной линии бесконечной длины.

Сопротивление, оказываемой линией бегущей волне, называется **волновым сопротивлением линии** - ρ . Волновое сопротивление можно найти по закону Ома, как $\rho = \frac{U_{m_{ex}}}{I_{m_{ex}}}$ где $U_{m_{ex}}$, $I_{m_{ex}}$ - амплитуды напряжения и тока, действующие на входе линии. Так как в бегущих волнах нет сдвига фаз между током и напряжением, то для любого сечения линии волновое сопротивление активно и равно $\rho = \frac{u_x}{i_x} = \frac{U_m}{I_m}$.

Если бесконечную линию разорвать на некотором расстоянии от генератора (рис. 4, а), то правая часть линии для ограниченной линии, находящейся левее сечения А-А, явится бесконечной линией с тем же входным сопротивлением ρ . Очевидно, режим работы линии не нарушится, если вместо правой части включить резистор с активным сопротивлением $R_H = \rho$ (рис. 4, б). Следовательно, в линии ограниченной длины, нагруженной активным сопротивлением,

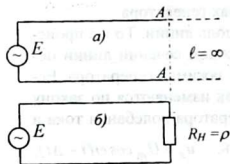


Рис. 4

равным её волновому сопротивлению, имеют место бегущие волны. То есть, в линии конечной длины (с нагрузкой) волны распространяются так же, как в бесконечно длинной линии. В этом случае говорят, что **линия согласована с нагрузкой**.

Проводник длиной Δl обладает активным сопротивлением ΔR и индуктивностью ΔL , а между двумя проводниками линии имеются емкость ΔC и активная проводимость ΔG . В отличие от привычных радиотехнических цепей, где элементы R , L , C и G сосредотачивались в определенных точках схемы, в линиях они распределены по всей ее длине. Поэтому линии называют цепями с распределенными параметрами.

Распределенные параметры выражаются погонной индуктивностью ΔL (Гн/м), погонной емкостью ΔC (Ф/м), погонным сопротивлением ΔR (Ом/м) и проводимостью ΔG (См/м), приходящимися на единицу длины (1 м) линии. Для идеальной линии, у которой отсутствуют потери энергии, $\Delta R = 0$ и $\Delta G = 0$, эквивалентная схема идеальной линии может быть представлена в виде цепочки связанных контуров (рис. 5).

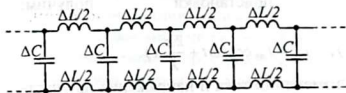


Рис. 5

Если линия однородна, то все контуры получаются одинаковыми и настроенными на одну и ту же частоту. Но бесконечная линия не может быть резонансной, ибо бесконечную линию всегда

можно разбить на ячейки (контуры) с любой заданной частотой, чего нельзя сказать о конечной линии.

Через параметры линии можно выразить ее волновое сопротивление ρ , скорость распространения волн v и др. Например, в любой момент времени

энергия, запасаемая в распределенных индуктивностях ΔL , равна энергии, запасаемой в распределенных емкостях ΔC . Например, для максимальных значений тока и напряжения: $\frac{\Delta L \cdot I_m^2}{2} = \frac{\Delta C \cdot U_m^2}{2}$. Отсюда можно получить значение волнового сопротивления: $\rho = \frac{U_m}{I_m} = \sqrt{\frac{\Delta L}{\Delta C}}$.

Скорость распространения волны определяется аналогично: $\mathcal{G} = \frac{l}{\sqrt{\Delta L \cdot \Delta C}}$.

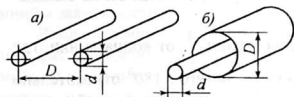


Рис. 6

Погонная емкость двухпроводной линии (рис. 6, а) определяется по формуле:

$$\Delta C = \frac{\pi \epsilon \epsilon_0}{\ln \frac{2D-d}{d}}, \text{ Ф/м. Погонная индуктив-}$$

ность этой же линии $\Delta L = \frac{\mu \mu_0}{\pi} \ln \frac{2D}{d}$, Гн/м. Здесь, ϵ и μ - диэлектрическая и магнитная проницаемости среды, окружающей проводники линии (воздух, диэлектрик).

Волновое сопротивление двухпроводной воздушной линии вычисляется по формуле $\rho = 276 \lg \frac{2D}{d}$. Для коаксиальной линии (рис. 6, б) волновое сопротивление равно $\rho = \frac{138}{\sqrt{\epsilon}} \lg \frac{D}{d}$.

Здесь, ϵ - диэлектрическая проницаемость среды, изолирующей внутренний проводник от внешнего.

В случае несогласованной конечной линии, когда сопротивление нагрузки не равно волновому сопротивлению линии, то есть, $R_H \neq \rho$, энергия волн, движущихся от генератора, не усваивается полностью на нагрузке и часть энергии возвращается обратно в линию, в виде отраженных волн, движущихся к генератору, то есть, в линии одновременно имеют место падающие (от генератора) и отраженные (от нагрузки) волны. Являясь полностью когерентными, они создают интерференционную картину стоячих и комбинированных волн.

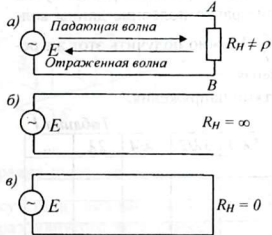


Рис. 7

Комбинированными волнами называется такое распределение тока и напряжения, при котором амплитуда колебаний тока и напряжения в различных сечениях линии не совпадают. Для **стоячих волн** характерно наличие **пучностей**, где имеется максимум амплитуды колебаний, и **узлов**, где колебания вообще отсутствуют.

Представляют интерес два случая: $R_H = \infty$ (разомкнутая на конце линия, рис. 7, б) и $R_H = 0$ (короткозамкнутая на конце линия, рис. 7, в). В первом случае в конечных точках линии A и B ток равен нулю, а амплитуда напряжения имеет максимум. Это говорит о том, что при отражении от разомкнутого конца линии фаза волны тока поворачивается на угол 180° и поэтому в точках A и B отраженная и падающая волны тока взаимно уничтожаются. Однако волна напряжения при отражении фазы не меняет и поэтому отраженная волна складывается с падающей волной.

Такое же положение наблюдается на расстоянии $\frac{\lambda}{2}$ от конца линии, где падающая волна опережает, а отраженная отстает на угол 180° относительно колебаний на конце линии. Здесь общий сдвиг фазы между падающей и отраженной волной составляет 360° и потому сложение колебаний тока и напряжения аналогично сложению колебаний тока и напряжения на конце линии. Таким образом, при отсчете от конца разомкнутой линии через промежутки длиной в полволны наблюдается узел тока и пучность напряжения.

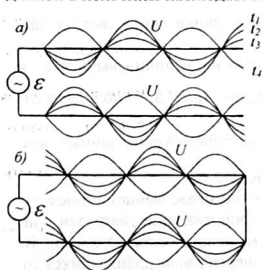


Рис. 8

На рисунке 8, а показано распределение напряжения в разомкнутой линии для различных моментов времени. Наличие в линии узлов, точек, в которых амплитуда колебаний равна нулю, позволяет довольно легко измерить длину электромагнитной волны. Для этого достаточно измерить расстояние между ближайшими двумя сечениями линии, где напряжения равны нулю. Это расстояние равно половине длины волны, то есть, $\frac{\lambda}{2}$. Можно получить этот же результат, изменяя расстояния между пучностями напряжения.

Таблица 1

	$R_H = \infty$	0	$\lambda/4$	$\lambda/2$	$3\lambda/4$	λ	$5\lambda/4$	$3\lambda/2$	$7\lambda/4$	2λ	...
U	узлы										
	пучности	+									
I	узлы	+									
	пучности										

В случае замкнутой линии, ввиду отсутствия сопротивления на конце линии, напряжение между точками A и B равно нулю, что говорит о сдвиге фазы волны напряжения при отражении на угол 180° . Ток в сечении $A-B$ наоборот, имеет максимальное значение. Распределение напряжения для этого случая показано на рис. 8, б. При этом также имеется возможность измерения длины волны и наблюдения узлов и пучностей стоячих волн. Распределения узлов и пучностей при $R_H = \infty$ и $R_H = 0$ можно понять, самостоятельно заполняя таблицы 1 и 2.

$R_H = 0$	0	$\lambda/4$	$\lambda/2$	$3\lambda/4$	λ	$5\lambda/4$	$3\lambda/2$	$7\lambda/4$	2λ	...
U	узлы	+								
	пучности									
I	узлы									
	пучности	+								

Расставьте в таблицах с помощью знаков «+» положения узлов и пучностей волн напряжения и тока для разомкнутой и короткозамкнутой отрезков линий в зависимости от расстояния от конца линии (в длинах волн).

Входное сопротивление линии конечной длины определяется соотношением фаз падающих и отраженных волн на входе и поэтому зависит от длины линии. В зависимости от соотношения фаз оно может принимать активный, емкостный или индуктивный характер. Например, для короткозамкнутой линии входное сопротивление определяется по формуле $Z_{вх} = \rho \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{2\pi}{\lambda} \ell\right)$, а для разомкнутой линии - $Z_{вх} = -\rho \cdot \operatorname{ctg}\left(\frac{2\pi}{\lambda} \ell\right)$, где ℓ - длина отрезка линии.

Очень интересны свойства отрезков линий длиной $\ell = \frac{\lambda}{4}$, $\ell = \frac{\lambda}{2}$ (рис. 9).

Если линию замкнуть отрезком замкнутой линии длиной $\ell = \frac{\lambda}{4}$, то он ведет себя как изолятор, так как

его входное сопротивление

$$Z_{вх} = \rho \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{\lambda}{4}\right) = \rho \cdot \operatorname{tg} \frac{\pi}{2} = \infty.$$

Поэтому короткозамкнутые четверть-волновые отрезки линий могут использоваться в качестве «металлических изоляторов». Однако, если взять разомкнутой отрезок линии длиной $\ell = \frac{\lambda}{4}$, то здесь,

наоборот, входное сопротивление

равно нулю, то есть, $Z_{вх} = -\rho \cdot \operatorname{ctg}\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{\lambda}{4}\right) = -\rho \cdot \operatorname{ctg} \frac{\pi}{2} = 0$. Поэтому даже при от-

сутствии видимой электрической связи между проводами линии, включение разомкнутого четвертьволнового отрезка линии проводит к короткому замыканию линии для распространяющихся вдоль нее электромагнитных волн.

(Свойства полуволновых отрезков линий предлагаем проанализировать самостоятельно).

Если к длинной линии присоединить множество короткозамкнутых отрезков линий, то условия распространения волн в линии не нарушатся, так как каждый замкнутый отрезок является изолятором (рис. 10, а, б). Линия превращается в прямоугольный желоб (рис. 10, в). А если к нему приложить еще такой

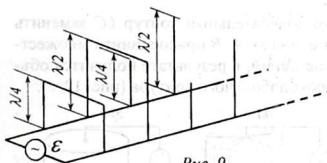


Рис. 9

же желоб, получится сплошной металлический волновод (рис, 10, з). Здесь уже действительно трудно говорить о переменном электрическом токе. Энергия распространяется в волноводе в виде электромагнитных волн, отражающихся попеременно от одной стенки волновода к другой.

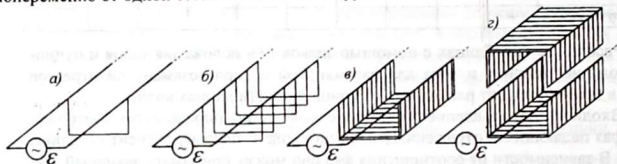


Рис. 10

Наличие резонансных свойств у отрезков длинных линий позволяет использовать их в качестве колебательных контуров. Например, короткозамкнутый четвертьволновой отрезок линии по своим свойствам аналогичен параллельному контуру (рис. 11, а), а разомкнутый четвертьволновой отрезок линии аналогичен последовательному колебательному контуру (рис. 11, б).

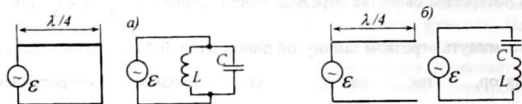


Рис. 11

На рисунке 12 показано, как можно колебательный контур LC заменить четвертьволновым отрезком линии. Если в точках A, B присоединить множество одинаковых короткозамкнутых отрезков линий, в результате получится объемный резонатор, выполняющий роль высокодобротного контура (рис. 12, з).

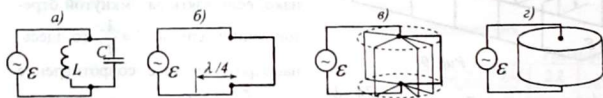


Рис. 12

Следует отметить, что размеры волноводов и резонаторов для низких частот получаются громоздкими, поэтому они используются в диапазоне СВЧ (сверхвысоких частот), где длина волны измеряется в дециметрах, сантиметрах, миллиметрах.

2. Схема исследования

В данной лабораторной работе исследуется двухпроводная линия (рис. 13), которая имеет следующие параметры: длина $l = 6$ м, диаметр проводников $d = 1,5$ мм, а расстояние между ними $D = 150$ мм. (При этих данных линия об-

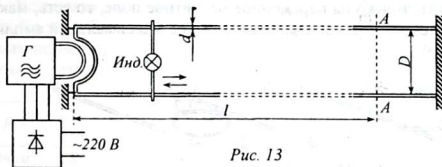


Рис. 13

ладает следующими параметрами: погонная индуктивность $\Delta L = 2,12 \text{ мкГн/м}$, погонная емкость $\Delta C = 5,25 \text{ пФ/м}$, волновое сопротивление $\rho = 635,5 \text{ Ом}$, скорость распространения волны $v = 299,8 \cdot 10^6 \text{ м/с}$.

В качестве генератора используется распространенный учебный генератор УВЧ, представляющий собой генератор метровых волн с частотой 150 МГц (рис. 14). Это двухтактный генератор на двух вакуумных триодах, работающих на общую нагрузку. Отрезок линии, сделанный в виде дуги из латунной трубки, выполняет функции колебательного контура, а обратная связь осуществляется через проходные емкости ламп. Дроссели ($L1 \div L8$) преграждают путь высокочастотным токам в источники питания и смещения. Энергия от генератора в линию передается через полувиток связи, расположенной вблизи контура генератора.

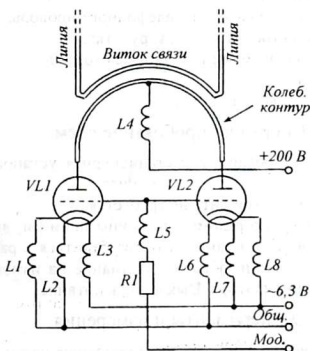


Рис. 14

Для регистрации наличия волн в линии используются два вида индикаторов: индикатор электрической напряженности E (рис. 15, а) и индикатор магнитной напряженности H (рис. 15, б).

Первый индикатор дает максимальное свечение в сечениях линии, где имеет место максимум амплитуды напряжения и соответственно наибольшая амплитуда напряженности электрического поля (пучности напряжения). Другой

индикатор реагирует только на переменное магнитное поле, то есть, максимум свечения лампочки соответствует участкам линии с максимальной амплитудой тока (пучности тока),

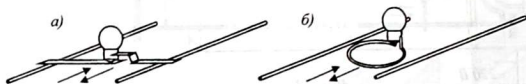


Рис. 15

С помощью этих индикаторов, ориентируя их в различных направлениях, можно установить ориентацию векторов \vec{E} и \vec{H} , судить об их интенсивности по яркости свечения лампочек.

Следует отметить, что индикаторы, обладая комплексным сопротивлением и поглощая из линии значительную мощность, вносят сильные искажения в работу линии и поэтому не гарантируют высокой точности измерений.

3. Оборудование и приборы

1. Генератор метровых волн (генератор УВЧ).
2. Источник питания ВУП-2 или УИП-2.
3. Двухпроводная линия.
4. Индикаторы «E» и «H».
5. Отрезки коаксиального кабеля и телефонного провода.
6. Штангенциркуль, метровая линейка, рулетка.
7. Замыкающий шлейф и четвертьволновые отрезки.
8. Микрокалькулятор.
9. Соединительные провода и шнуры.

4. Сборка и опробование схем

Длинная линия смонтирована, как стационарная установка с постоянно присоединенным источником питания. Полных соединений производить не требуется.

Перед включением нужно разомкнуть концы линии и, включив питание генератора, с помощью любого из индикаторов убедиться в работе линии. Передвигая индикатор вдоль линии, обратить внимание на изменение интенсивности свечения лампочки индикатора. Выключить питание.

5. Эксперименты и измерения

1. Ознакомиться с установкой, найти ее основные части, проверить комплектность необходимого оборудования.

2. Измерить диаметр проводов и расстояние между ними. На основании этих данных рассчитать значения погонной емкости ΔC , погонной индуктивности ΔL , волновое сопротивление ρ и скорость распространения волны в линии v . Те же вычисления провести для телевизионного кабеля и двухжильного телефонного провода, приняв $\epsilon = 2,36$. Для расчетов использовать микрокалькулятор.

3. Установив индикатор «*E*» и оставив линию разомкнутой, включить питание. После 1-2 минутного прогрева генератора проверить наличие свечения лампочки индикатора. Передвигая индикатор вдоль линии, с помощью бумажных полосок отмечать точки максимума свечения лампочки.

Таблица 3

$R = \infty$		Расстояния от начала линии, см				
		1	2	3	4	5
Точки	<i>E</i>					
максимума	<i>H</i>					

4. Выключить питание и с помощью рулетки измерить расстояния между ленточками и фиксировать расстояния до них от начала линии. Данные занести в таблицу 3.

5. Повторить действия (пп. 3, 4), используя индикатор «*H*». Данные также занести в таблицу 3.

6. Выключив питание, с помощью металлического шлейфа замкнуть конец линии. После включения генератора повторить измерения, аналогичные пп. 3, 4, 5, и данные занести в таблицу 4. Выключить питание.

Таблица 4

$R = 0$		Расстояния от начала линии, см				
		1	2	3	4	5
Точки	<i>E</i>					
максимума	<i>H</i>					

7. Разомкнуть линию и, включив питание, установить индикатор «*E*» в точку максимума вблизи конца линии. Подвесив на линию (со стороны генератора) два четвертьволновых отрезка линии, убедиться, что произошло короткое замыкание линии. При этом индикатор на другой половине линии не должен показывать наличия волн, даже если его передвигать. Замкнув шлейфом концы отрезков, убедиться в наличии волн во второй половине линии. Выключить питание. Сделать выводы.

8. Убрать четвертьволновые отрезки, установить на линии рядом друг с другом индикаторы «*E*» и «*H*». Включить питание и, передвигая одновременно оба индикатора, обратить внимание на их совместную работу. Выключить питание. Сделать выводы и сопоставить свои выводы с рисунком 3.

6. Указания к отчету

Отчет должен содержать следующие материалы:

1. Наименование и цель работы.
2. Эквивалентную схему длинной линии и формулы для расчета.
3. Схему генератора и двухпроводной линии.
4. Таблицы измерений и результаты расчетов.
5. Ответы на контрольные вопросы.
6. Выводы.

7. Вопросы для подготовки

1. Что называется длинной линией?
2. Какие бывают линии?
3. Для чего применяются длинные линии?
4. Почему однородная линия не излучает электромагнитные волны?
5. Какие волны называются бегущими?
6. Как понимать «согласование линии с нагрузкой»?
7. Что имеется на концах замкнутой и разомкнутой линий?
8. Чему равно расстояние между ближайшими узлами и пучностями?
9. Каковы свойства короткозамкнутого и разомкнутого четвертьволновых отрезков линий?
10. Что такое «металлический изолятор»?
11. Что такое «волновод» и «резонатор»? Как они создаются?

9. Литература

1. Гершензон Е.М. и др. Радиотехника учеб. пособие для педвузов-М.: Просвещение, 1986, с 55-60.
2. Манаев Е.И. Основы радиоэлектроники. – М. Радио и связь 1985. с. 51-56.

ИЗУЧЕНИЕ НАПРАВЛЕННЫХ СВОЙСТВ АНТЕНН

Цель работы:

1. Ознакомиться с принципом работы передающих и приёмных антенн.
2. Научиться строить и понимать диаграмму направленности излучения (приема) антенны.

Содержание работы:

1. Изучение устройства и снятие характеристик направленности одно- и многоэлементных антенн.
1. Краткие теоретические сведения

Для излучения и приема электромагнитной энергии пользуются специальными устройствами – антеннами. Антенна, преобразующая энергию принятых электромагнитных волн в энергию переменного тока высокой частоты, называется *приемной* антенной. Антенна, предназначенная для преобразования энергии высокочастотного тока в энергию излучаемых ею электромагнитных волн, называется *передающей*.

Для антенн справедлив *принцип обратимости*: одна и та же антенна может служить и передающей антенной и приемной антенной.

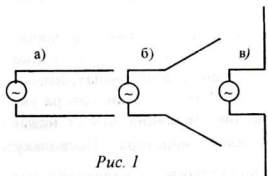


Рис. 1

Любой проводник, по которому течет переменный ток определенной частоты, излучает в пространство электромагнитные волны той же частоты. Простейшая антенна образуется путем развертывания двух проводов разомкнутой длинной линии, в результате которого они образуют развернутый угол 180° (рис. 1). При этом условия взаимокompенсации

электрических и магнитных полей проводов в пространстве нарушаются и образуется, так называемый, открытый колебательный контур, способный излучать электромагнитные волны. Такую антенну называют симметричным вибратором (диполем). Так же, как и линия, антенна обладает распределенной емкостью и индуктивностью, ее эквивалентная схема показана на рисунке 2.

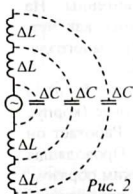


Рис. 2

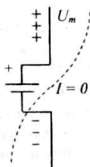


Рис. 3

Если к симметричному вибратору (рис. 3) подключить источник постоянной э.д.с., то распределенные емкости зарядятся. После отключения источника и замыкания проводов вибратора (рис. 4, а) начнется разряд распределенных емкостей. При этом наибольший ток проходит через середину вибратора, так как по этому участку проходят заряды всех распределенных

емкостей, к концам вибратора ток уменьшается до нуля.

При разряде элементарных конденсаторов энергия электрического поля распределенных ёмкостей переходит в энергию магнитного поля распределенных индуктивностей. Ток в проводе достигает максимального значения в момент полного разряда элементарных конденсаторов (рис. 4, в).

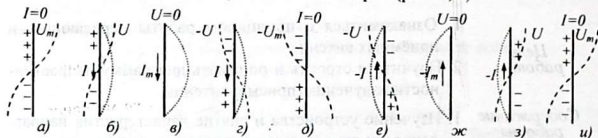


Рис. 4

В следующий момент ток начинает уменьшаться. Однако процесс переноса зарядов продолжается в том же направлении, что объясняется наличием э.д.с. самоиндукции, обусловленной распределенной индуктивностью проводов (рис. 4, з). К моменту, когда ток уменьшится до нуля, емкости оказываются перезаряженными (рис. 4, д).

Наибольшее напряжение создается между концами вибратора, так как при одинаковом заряде распределенных емкостей наибольшее напряжение соответствует минимальной емкости $U = \frac{\Delta Q}{\Delta C}$. После этого описанный процесс разряда повторяется вновь, но только теперь ток протекает в обратном направлении (рис. 4, е, ж, з, и).

В результате возникновения свободных колебаний в антенне устанавливается стоячие волны тока и напряжения. Из рисунка 4 видно, что в середине вибратора имеют место пучность тока и узел напряжения, а на концах, наоборот, — узлы тока и пучности напряжения. Таким образом, вдоль вибратора укладывается половина длины волны тока и напряжения. Величина $\lambda_0 = 2\ell$ называется собственной длиной волны симметричного вибратора. Поскольку геометрическая длина антенны $\ell = \frac{1}{2}\lambda_0$, поэтому она называется *полуволновым вибратором*.

Наилучший прием и излучение антенна обеспечивает при условии равенства собственной длины волны λ_0 с длиной волны принимаемого или излучаемого сигнала λ , то есть $\lambda = \lambda_0$.

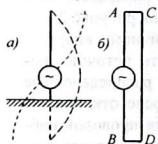


Рис. 5

Рассмотренная антенна — полуволновый вибратор — не является единственной конструкцией антенны. На практике широко применяются такие антенны, как четвертьволновой вибратор, петлевой вибратор, многоэлементные, рупорные и тому подобные антенны.

У *четвертьволнового вибратора* (рис. 5, а) в качестве второго плеча используется противовес (корпус корабля, самолета, шасси приемника, земля). Работает он так же, как и полуволновой вибратор. Проводящая «земля» как бы образует второе, недостающее плечо вибратора. Таким образом, гнездо «Заземление» на входе приемника или выходе передатчика

предназначено для подключения второго плеча четвертьволнового вибратора.

Петлевой вибратор (рис. 5, б) образован из двух полуволновых вибраторов: активного (AB) и пассивного (CD). Пассивный вибратор принимает электромагнитную волну, излученную активным вибратором и переизлучает ее в той же фазе; поэтому суммарная энергия излучения оказывается больше, чем у изолированного полуволнового вибратора. То же положение возникает при приеме радиоволн: пассивный вибратор переизлучает принятую волну и увеличивает напряженность поля у активного вибратора.

Одной из важнейших характеристик антенны является направленность излучения (и приема). **Направленностью антенны** называется способность антенны излучать энергию в одном направлении лучше, чем по другим направлениям. Это свойство антенны характеризуется **диаграммой направленности**, показывающей зависимость напряженности электрического поля E , создаваемой излучающей антенной на равных удалениях от антенны. Для приемной антенны она выражается зависимостью э.д.с. антенны от ее пространственной ориентации относительно передатчика.

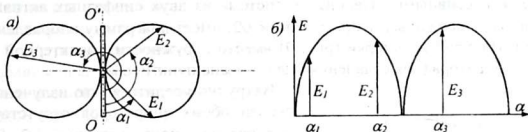


Рис. 6

Диаграмму направленности антенн обычно представляют в полярной системе координат, как зависимость модуля вектора напряженности электрического поля E от направления, характеризуемого углом направления α , то есть, зависимость $E = f(\alpha)$ (рис. 6, а).

Диаграмма направленности, построенная в прямоугольной системе координат, проста и удобна для расчетов, однако, в полярной системе она удобнее.

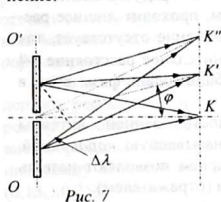


Рис. 7

Ввиду обратности антенны диаграммы направленности излучения и приема совпадают. Неодинаковое излучение в различных направлениях объясняется сложением полей, создаваемых всеми участками и элементами антенны. Нетрудно убедиться в том, что в плоскости, проходящей через ось симметрии вибратора (рис. 7), энергия по различным направлениям излучается неодинаково. Наиболее интенсивное излучение происходит в направлении, перпендикулярном к оси вибратора OO' , так как токи в обеих половинах вибратора протекают в одном направлении и волны в точку K приходят в одинаковой фазе и усиливают друг

друга. В точки K' и K'' , расположенные на других направлениях, волны от двух плеч вибратора приходят сдвинутыми по фазе относительно друг друга.

Этот сдвиг $\Delta\lambda$ получается за счет разности хода волн, излучаемых обоими плечами вибратора. Чем больше угол φ , тем больше разность хода, а в направлении, совпадающем с осью вибратора, излучение вообще отсутствует, так как $\Delta\lambda = \lambda/2$.

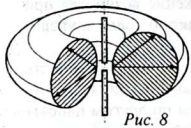


Рис. 8

В плоскостях, перпендикулярных к оси вибратора, интенсивность излучения по всем направлениям одинакова и диаграмма направленности имеет форму окружности. Пространственная диаграмма направленности симметричного вибратора имеет тороидальную форму (рис. 8).

В ряде случаев бывает желательно всю мощность излучения сосредоточить в одном направлении. Это позволяет увеличить напряженность поля в месте приема без увеличения мощности передатчика, уменьшить помехи другим станциям. Для этой цели используют антенны с несколькими вибраторами (активными и пассивными). Например, система из двух синфазных активных вибраторов, расположенных на расстоянии $\lambda/2$, имеет диаграмму направленности в виде вытянутой восьмерки (рис. 9) вместо окружности, характерной для одиночного вибратора (для сравнения она показана пунктиром).

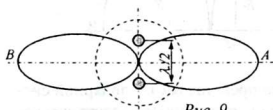


Рис. 9

Нетрудно убедиться, что излучение в плоскости обоих вибраторов отсутствует, так как разность хода составляет $\lambda/2$. Данная антенна обеспечивает одинаковый прием с двух противоположных направлений (слева и справа).

Применив другую систему вибраторов, можно получить преимущественное излучение (прием) в одном направлении. Пусть 2 вибратора расположены на расстоянии $\lambda/4$ и имеют токи, сдвинутые по фазе на 90 градусов (рис. 10). Пусть в нашем случае ток вибратора 2 отстает от тока вибратора 1. В направлении А волны, излученные обоими вибраторами, движутся, совпадая по фазе. Сдвиг фаз на 90 градусов компенсируется тем, что волна, излученная первым вибратором, проходит лишнее расстояние в четверть волны (90°). В направлении В излучение отсутствует, так как волна, излучаемая вибратором 2, проходит дополнительное расстояние $\lambda/4$ и отстает, кроме начального, еще на 90 градусов. Общий сдвиг фазы волн в этом направлении - 180 градусов.

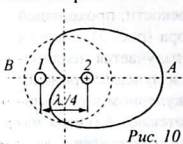


Рис. 10

Диаграмма направленности данной антенны представляет собой кривую, называемую *кардиоидой*. Одностороннее излучение и прием позволяют назвать первый вибратор рефлектором (отражателем).

На практике удобнее иметь антенны с одним активным вибратором. Остальные вибраторы могут быть пассивными, получая энергию от электромагнитной

волны и переизлучая ее вновь на той же частоте, причем со сдвигом фазы, зависящим от длины пассивного вибратора.

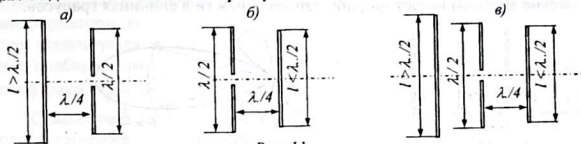


Рис. 11

Рассмотрим передающую антенну с одним пассивным вибратором - *рефлектором* (рис. 11, а). Для этого длина вибратора рефлектора выбирается несколько длиннее, чем $\lambda/2$. Вспомните, что сопротивление разомкнутого отрезка линии равно $Z = -\rho \cdot \operatorname{ctg}(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \ell)$, где ℓ - длина отрезка линии. Поэтому при длине $\ell > \frac{\lambda}{2}$ сопротивление рефлектора носит индуктивный характер.

Рефлектор, расположенный на расстоянии $\lambda/4$ от активного вибратора, получает энергию излучаемых им электромагнитных волн. Эти волны проходят путь в $\lambda/4$, за счет которого создается их отставание по фазе на 90 градусов. Электродвижущая сила, индуцируемая в рефлекторе, отстает еще на 90 градусов от создающей её электромагнитной волны. Из-за того, что длина рефлектора больше, чем $\lambda/2$, его сопротивление носит индуктивный характер, и ток в нем отстает от э.д.с. еще на 90 градусов. В результате ток в рефлекторе отстает от тока в активном вибраторе на 270 градусов, что равносильно опережению на 90 градусов. А это и есть условие излучения в сторону, противоположную рефлектору.

Возможен и другой вариант получения наибольшего излучения в одну сторону. Если второй вибратор (см. рис. 11, б) сделать пассивным и длину его взять короче, чем $\lambda/2$, то диаграмма направленности останется прежней. Сопротивление короткого вибратора при этом имеет емкостный характер, ток в нем опережает на 90 градусов э.д.с., наведенную в нем, излученной активным вибратором электромагнитной волной. При этом фаза тока в пассивном вибраторе отстает от тока в активном вибраторе на 90 градусов, это соответствует условию максимального излучения в сторону пассивного вибратора, называемого *директором*.

Для получения узконаправленной передачи и приема, антенна может содержать рефлектор и несколько директоров (рис. 12). Каждый следующий директор отстоит от предыдущего на расстоянии $\lambda/4$. На практике, в пассивных вибраторах сдвиг фазы происходит не точно на 90 градусов, поэтому расстояния между вибраторами подбираются экспериментально и лежат в пределах $(0,15 \dots 0,25)\lambda$.

Шириной диаграммы направленности (рис. 13) называется угол 2θ между двумя направлениями, вдоль которых напряженность поля уменьшается в

$\sqrt{2} \approx 0,7$ раз по сравнению с максимальной напряженностью поля. Чем меньше угол 2θ , тем лучше направленные свойства антенны. Например, спутниковые параболические антенны имеют ширину направленности в единицах градусов.

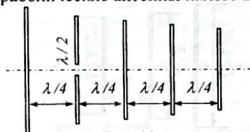


Рис. 12

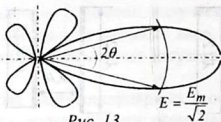


Рис. 13

Поскольку размеры вибраторов сравнимы с длиной волны, многоэлементные антенны применяют, в основном, в метровом и дециметровом диапазонах. В частности, в телевидении широко применяется трехэлементная антенна типа «волновой канал», состоящая из активного вибратора, пассивного рефлектора и пассивного директора (рис. 11, в).

2. Схема исследования

Установка состоит из передающей и приемной антенн. В качестве передающей антенны используется петлевой вибратор, в качестве приемной - многоэлементная антенна типа «волновой канал» (рис. 14).

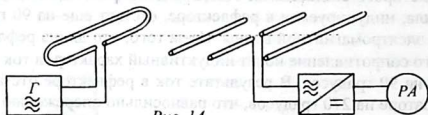


Рис. 14

Питание на передающую антенну подается от высокочастотного генератора через коаксиальный кабель. А поскольку внешний проводник кабеля (оплетка кабеля) обычно заземляется, то сигнал поступает только по центральному проводу. Подача противофазных напряжений на зажимы вибратора осуществляется через специальное *симметрирующее устройство*.

Симметрирование заключается в подаче на второй зажим вибратора напряжения, сдвинутого по фазе на 180° относительно первого. Такой фазовращатель выполняют в виде отрезка линии (кабеля) длиной $l = \frac{\lambda}{2}$ (рис. 15). Нахождение этого отрезка волна затрачивает половину периода и поэтому напряжения в точках *A* и *B* всегда противофазны.

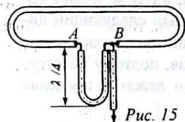


Рис. 15

Антенна обладает определенным волновым сопротивлением ρ_a , зависящим от конструкции и размеров антенны. Например, волновое сопротивление полуволнового вибратора равно 75 Ом, а петлевого вибратора - 300 Ом. Получение высокого к.п.д. антенны возможно при строгом согласовании сопротивлений антенны и фидера (кабеля). В случае, если волновое сопротивление антен-

ны не совпадает с волновым сопротивлением кабеля, применяют согласующие трансформаторы, выполненные также из отрезков линий (рис. 16). Для согласования используется четвертьволновой отрезок линии с волновым сопротивлением, подбираемым как среднее геометрическое между волновым сопротивлением фидера ρ_f и антенны ρ_a : $\rho_{mp} = \sqrt{\rho_f \cdot \rho_a}$

Сущность согласования состоит в следующем. Волна, подходящая со стороны генератора, ввиду несогласованности $\rho_f \neq \rho_{mp}$, частично отражается от входа трансформатора (сечение $A-A'$) и частично проникает, через согла-

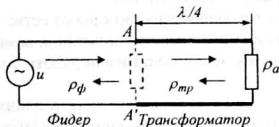


Рис. 16

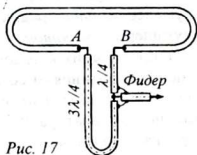


Рис. 17

сующий трансформатор к зажимам антенны. Ввиду несогласованности волновых сопротивлений трансформатора и антенны ($\rho_{mp} \neq \rho_a$), от антенны волна вторично отражается и возвращается к входу трансформатора, пройдя расстояние $\lambda/4 + \lambda/4 = \lambda/2$. Поэтому волны, отраженные от трансформатора и от антенны, в точке включения трансформатора ($A-A'$) будут иметь противоположные фазы. При равенстве амплитуд отраженных волн произойдет их полная компенсация, и вдоль фидера будут распространяться только бегущие волны, что возможно при условии полного согласования фидера с антенной. Ввиду принципа обратимости, волна, идущая от антенны к фидеру, будет также распространяться без отражения.

В случае необходимости применения одновременно симметрирующего и согласующего устройства используется симметрирующе-согласующее устройство. Часть U-колена ...

а общая длина U-колена достигает λ . Точка подключения фидера делит петлю в отношении 1:3. Обратите внимание, что волновое сопротивление кабеля симметрирующе-согласующего устройства не совпадает с волновым сопротивлением фидера.

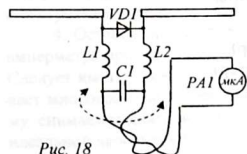


Рис. 18

Примемная антенна смонтирована на штативе и может поворачиваться вокруг вертикальной оси. Связанный с ним лимб с делениями позволяет отсчитывать углы поворота антенны через каждые 15° (рис. 18). Напряжение с зажимов антенны поступает на детектор, состоящий из высокочастотного точечного диода VDI и сглаживающего фильтра $LICIL2$. Выпрямленный диодом ток измеряется микроамперметром $PA1$, в качестве которого ис-

пользуется ампервольтметр АВО-5М.

Конструкция приемной антенны позволяет легко преобразовать ее в многоэлементную путем добавления пассивных вибраторов (рефлектора и директора).

В качестве источника высокочастотных электрических колебаний используется генератор сверхвысокочастотных (СВЧ) колебаний Г4-37А, позволяющий получать электрические колебания УКВ диапазона с длиной волны от 25 до 75 см. При этом размеры антенн оказываются небольшими. Генератор СВЧ состоит из задающего генератора и резонансного усилителя мощности, а также генератора модулирующих колебаний. На передней панели генератора расположены следующие органы управления и контроля:

- тумблер «Сеть» предназначен для включения питания от сети;
- тумблер «Генератор ВЧ» служит для включения питания ламп генератора после прогрева их катодов и для временной остановки работы генератора без выключения питания от сети;
- ручка «Установка частоты» - для установки частоты несущих колебаний задающего генератора. Ручка связана со спиральной шкалой «МГц»;
- ручка «Подстройка» - для точной настройки контура резонансного усилителя мощности на частоту задающего генератора с целью получения максимальной выходной мощности;
- ручка «Расстройка» - для изменения частоты генератора в небольших пределах;
- ручка «Регулировка выхода» - для установки требуемой выходной мощности, контролируемой по встроенному ваттметру, шкала которого градуирована в децибелах (шкала «дБ»);
- ручка «Род работы» - для установки прибора в режим непрерывной генерации – «НГ» (без модуляции) или в режим амплитудной или частотной модуляции;
- ручка «Установка несущей» служит для установки амплитуды несущих колебаний;
- переключатель «Контроль несущей – М%» служит для отдельного контроля несущих и модулированных колебаний.

Назначение остальных органов управления связано с использованием прибора в качестве источника модулированных сигналов (например, для настройки телевизионной аппаратуры) и в данной работе положение их не играет роли.

3. Оборудование и приборы

1. Генератор Г4-37А.
2. Передающая антенна (петлевой вибратор).
3. Приемная антенна (полуволновой вибратор).
4. Ампервольтметр АВО-5М.
5. Набор пассивных вибраторов.
6. Соединительные провода и шнуры.

4. Сборка и опробование схемы

1. Ознакомиться с основными ручками управления и регулировок генератора Г4-37А.

2. Подключить фидер передающей антенны к гнезду «Выход $1 \dots 10^{-4} \text{ W}$ ».

3. Поставить тумблер «Генератор ВЧ» в положение «Выключено». Установить ручку «Расстройка» в нулевое положение, переключатель «Род работы» в положение «НГ», переключатель шкал измерителя выхода в положение «1 W».

4. Включить тумблер «Сеть» и через 1-2 минуты после загорания индикаторной лампочки произвести установку нуля измерителя выхода ручкой «Нач.уст.0».

5. Ручкой «Установка частоты» установить частоту 600 МГц и, поставив тумблер «Генератор ВЧ» в положение «Вкл», включив задающий генератор. Медленно поворачивая ручку «Регулировка выхода» вправо (не до упора) и одновременно манипулируя ручкой «Подстройка», добиться максимума по шкале выхода.

6. Ручкой «Регулировка выхода» по верхней шкале измерителя выхода ($-10 \text{ дБ} \div +2 \text{ дБ}$) установить мощность 1 Вт, имея в виду, что 0 дБ соответствует 1 ватту, а минус 10 дБ - уровню 0,1 Вт. При необходимости, повторно подстроить усилитель на максимум выходной мощности.

7. Выключить генератор и питание последовательным переводом в нижнее положение тумблеров «Генератор ВЧ» и «Сеть».

5. Эксперименты и измерения

1. Изучить устройство и назначение передающей и приемной антенн. Замерить геометрические размеры и вычислить собственную длину волны антенны и резонансную частоту каждой антенны.

2. Установить передающую и приемную антенны на одном уровне на расстоянии 1-2 метра, предварительно присоединив к приемной антенне микроамперметр (АВО-5М). Передающую антенну ориентировать так, чтобы максимум излучения происходил вдоль линии, соединяющей обе антенны. Лимб отсчета приемной антенны расположить так, чтобы направление наилучшего приема соответствовало делению 90° .

3. Установить рабочую частоту генератора в соответствии с размерами антенн. Включить СВЧ-генератор (вначале «Сеть» и, через 1-2 минуты, - «Генератор ВЧ»). Наблюдая за показаниями микроамперметра, и регулируя выходную мощность генератора ручкой «Регулировка выхода», добиться отклонения стрелки микроамперметра не менее, чем на 75% шкалы.

4. Оставив работу генератора неизменной, записывать показания микроамперметра при различных ориентациях приемной антенны (через каждые 15°). Следует иметь в виду, что наличие окружающих приборов, стен, людей вызывает многократные отражения и поглощение электромагнитных волн, и поэтому снимаемая диаграмма направленности антенны будет заметно отличаться от идеальной «восьмерки». Данные измерений занести в таблицу 1.

Таблица 1

φ , град.	0	15	30	45	60	75	...	345	360
I , мкА									

5. Поставив приемную антенну в положение наилучшего приема, произвести опыты с пассивными полуволновыми вибраторами разной длины ($l > \frac{\lambda_0}{4}$, $l < \frac{\lambda_0}{4}$). Устанавливая каждый из них попеременно то впереди, то позади активного вибратора, записывать в таблицу 2 показания микроамперметра.

Таблица 2

Название вибратора	Длина вибратора	Зависимость выходного тока антенны от положения пассивных вибраторов	
<i>Акт. вибратор</i>		<i>впереди</i>	<i>позади</i>
<i>Рефлектор</i>			
<i>Директор</i>			

6. Правильно установив директор и рефлектор, снять диаграмму направленности многоэлементной антенны. Данные занести в таблицу 3.

Таблица 3

φ , град.	0	15	30	45	60	75	...	345	360
I , мкА									

7. Выключить генератор. Построить диаграммы направленности антенн в декартовой и полярной системах координат. Для сравнения диаграммы направленности полуволнового вибратора и многоэлементной антенны строить совместно. Сделать выводы.

6. Указания к отчету

Отчет должен содержать следующие материалы:

1. Наименование и цель работы.
2. Определение направленности антенны.
3. Описание полуволнового, четвертьволнового и петлевого вибраторов.
4. Способы улучшения направленных свойств антенн.
5. Свойства пассивных вибраторов (директоров, рефлекторов).
6. Назначение симметрирующих и согласующих устройств.
7. Таблицы измерений.
8. Диаграммы направленности полуволнового вибратора и многоэлементной антенны, выполненные в декартовой и полярной системе координат.
9. Ответы на контрольные вопросы.

7. Контрольные вопросы.

1. Каковы условия излучения электромагнитных волн проводниками?

2. Как устроены антенны «полуволновой вибратор», «четвертьволновой вибратор», «петлевой вибратор»?
3. Перечислить основные параметры антенны. Какие из них наиболее важные?
4. Что такое «активный» и «пассивный» вибратор?
6. Что представляет собой диаграмма направленности антенны? Какие меры следует принимать для ее улучшения?
7. Как устроены многоэлементные антенны? Какую роль выполняют рефлектор и директор в трехэлементной антенне?
6. Что такое «симметрирующее устройство»? Каково ее назначение и устройство?
7. Что такое «согласующее устройство»? Для чего оно применяется?

8. Литература

1. Гершензон Е.М. и др. Радиотехника учеб. пособие для педвузов-М.: Просвещение, 1986.
2. Манаев Е.И. Основы радиозлектроники. – М. Радио и связь 1985.
3. Изюмов Н.М., Линде Д.П. Основы радиотехники. - М.: Гос. энерг. изд., 1959.

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ РАДИОПРИЁМНИКА ПРЯМОГО УСИЛЕНИЯ

Цель работы:

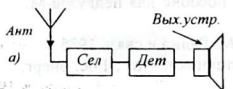
1. Ознакомиться с принципами радиоприема.
2. Изучить схему и устройство радиоприёмника прямого усиления.
3. Ознакомиться с принципом регенеративного радиоприёма.

Содержание работы:

Исследование радиоприёмников прямого усиления структуры $M-V-N$ и регенеративного радиоприёмника $0-V-0$.

I. Краткие теоретические сведения

Обязательными элементами любого радиоприёмного устройства являются: антенна, селектор, детектор и выходное устройство (рис. 1, а).



Простейшим радиоприёмником является детекторный радиоприёмник. Он состоит из антенны, параллельного (или последовательного) колебательного контура (выполняющего функции селектора), диодного детектора и выходного устройства – телефона (рис. 1, б).

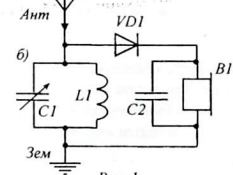


Рис. 1

Электромагнитные волны, как известно, имеют две векторные величины \vec{E} и \vec{H} , изменяющиеся во взаимно-перпендикулярных плоскостях (рис. 2). Если на пути распространения электромагнитных волн расположен провод, ориентированный параллельно вектору \vec{E} , или катушка, ось которой ориентирована параллельно вектору \vec{H} , то в них наводится э.д.с. той же частоты, что и электромагнитная волна. В этих случаях говорят об *электрической* или *магнитной антеннах*.

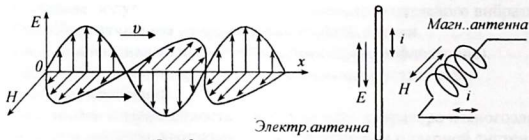


Рис. 2

Под действием э.д.с., наведенной электромагнитными волнами, в антенной цепи возникают переменные токи высокой частоты, протекающие, как принято говорить, от «антенны» к «земле». В эту цепь включается нагрузка антенны – колебательный контур ($L1C1$). Сколько радиостанций работает в данный момент, столько же переменных токов возникает в антенной цепи. Они отличаются частотой несущих колебаний. Задача селектора – выделить из совокупности

переменных токов в антенной цепи ток нужной станции, то есть, ток соответствующей частоты.

В зависимости от способа включения контура в нем возникает параллельный (или последовательный) резонанс. Например, в схеме, приведенной на рисунке 1, б, происходит параллельный резонанс. При этом сопротивление контура $LIC1$ максимально только для токов, имеющих частоту, равную или очень близкую к собственной частоте колебаний контура.

В схеме с последовательным контуром (рис. 3) имеет место последовательный резонанс и на частоте, равной или очень близкой к собственной частоте колебаний контура, напряжения на конденсаторе и катушке максимальны, а на всех остальных частотах эти напряжения ничтожны и практически равны нулю.

Таким образом, колебательный контур позволяет выделить сигнал нужной станции среди всевозможных сигналов, токи которых наведены в антенне. Выбор сигнала нужной станции производится настройкой контура на частоту принимаемой станции. Для этого достаточно изменить параметры контура (индуктивность $L1$ или емкость $C1$). На практике чаще всего это достигается изменением емкости контура механическим путем. Конденсатор $C1$ переменной емкости (со стрелкой) имеет ручку, с помощью которой, вращая ротор, можно устанавливать необходимую емкость конденсатора.

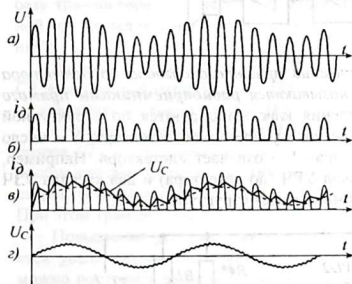


Рис. 4

Напряжение выделенного контуром $LIC1$ сигнала (рис. 4, а), прикладывается к диоду $VD1$. Диод, как известно, обладает односторонней проводимостью и пропускает ток в одном направлении и поэтому высокочастотный переменный ток через диод протекает как пульсирующий ток i_D (рис. 4, б). Если такой ток пропустить через телефон, то его мембрана не будет успевать колебаться со столь высокой частотой. Однако в составе этого тока имеются постоянная составляющая и переменные составляющие несущей и модулирующей частот.

Конденсатор $C2$, называемый блокировочным (он включен параллельно телефону), восстанавливает низкочастотную составляющую протектированного сигнала. На рис. 4, в показано изменение напряжения на конденсаторе $C2$ при прохождении импульсов тока. Таким образом, напряжение, приложенное к телефону не будет иметь форму отдельных импульсов, а будет изменяться по некоторой кривой, весьма близкой к огибающей модулированного входного напряжения (рис. 4, г). Под действием

этого напряжения через телефон протекает низкочастотный ток, преобразуемый в звуковой сигнал.

Основными параметрами радиоприёмников являются: *чувствительность*, *избирательность*, *выходная мощность*, *качество воспроизведения*.

Выходная мощность – это мощность принятого сигнала в выходном устройстве (телефоне, громкоговорителе и т. п.).

Чувствительность – это минимальное напряжение входного сигнала, при котором на выходе радиоприёмника обеспечивается нормальная мощность.

Избирательность – это способность радиоприёмника выделить сигнал нужной станции среди помех и сигналов других станций с близкими частотами.

Качество воспроизведения - характеризует степень близости формы выходного напряжения приемника передаваемому модулирующему сигналу.

Детекторный радиоприёмник не имеет источника питания и поэтому выходная мощность его невелика (порядка микроватт) и он способен принимать только мощные и близко расположенные станции. Чтобы повысить чувствительность радиоприёмника и мощность выходного сигнала, в схему приемника добавляются усилители. Усилители можно расположить до детектора (усилители радиочастоты - УРЧ) и после детектора (усилители звуковой частоты - УЗЧ). В этом случае блок-схема приёмника имеет вид, показанный на рис. 5.

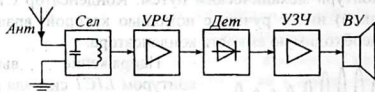


Рис. 5

Радиоприемники, в которых усиление принятого сигнала до детектора происходит на той же частоте, называются **радиоприемниками прямого усиления**. Приемники прямого усиления классифицируются по структурной формуле $M-V-N$, где M – число каскадов усиления до детектора, N – число каскадов усиления после детектора, знак V – означает «детектор». Например, приемник $1-V-2$ содержит один каскад УРЧ (до детектора) и два каскада УЗЧ (после детектора). Детекторный приемник имеет структуру $0-V-0$.

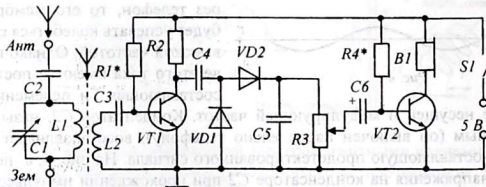


Рис. 6

Рассмотрим схему радиоприёмника прямого усиления $1-V-1$, построенного на транзисторах (рис. 6). Радиоприемник имеет магнитную антенну, состоящую

из ферромагнитного стержня, на котором намотана катушка $L1$ колебательного контура $L1C1$ и катушка связи $L2$.

При совпадении собственной частоты контура с частотой принимаемой станции в контуре возникает параллельный резонанс и в нем происходит увеличение амплитуды колебаний тока принимаемого сигнала. Настройка приемника на нужную станцию осуществляется путем изменения емкости конденсатора $C1$. Для увеличения чувствительности приемника в схеме предусмотрена возможность подключения к контуру наружной электрической антенны. Конденсатор $C2$ уменьшает емкость внешней антенны и устраняет её влияние на настройку приемника при смене антенны.

Высокочастотные электрические колебания, выделенные контуром $L1C1$, снимаются с катушки $L2$, индуктивно связанной с $L1$ через общий магнитный сердечник, и через конденсатор $C3$ подаются на базу транзистора $VT1$, работающего в режиме усиления (класс усиления А). Усиленные колебания снимаются с нагрузки транзистора – резистора $R2$ и поступают на вход диодного детектора с удвоением напряжения. Диоды $VD1$, $VD2$ совместно с конденсаторами $C4$ и $C5$ включены таким образом, чтобы использовать оба полупериода высокочастотных колебаний. При этом выходное напряжение детектора почти вдвое больше выходного напряжения детектора, построенного на одном диоде. Это несколько увеличивает выходную мощность приемника.

Потенциометр $R3$ одновременно является нагрузкой детектора и регулятором громкости звучания приемника. Напряжение низкой частоты подается на базу транзистора $VT2$, через конденсатор большой емкости $C6$ (знак «+» у одной из обкладок означает, что это – электролитический конденсатор, полярный).

Нагрузкой транзистора $VT2$ является головной телефон $B1$. Конденсатор $C7$, включенный параллельно телефону, выравнивает частотную характеристику усилителя и служит для обеспечения нормального звучания (тембра).

С помощью резисторов $R1^*$ и $R4^*$ устанавливается рабочий режим транзисторов $VT1$ и $VT2$ («звездочка» в их обозначениях означает, что их номиналы подбираются в процессе налаживания радиоприемника). Каждый из этих резисторов устанавливает начальный базовый ток соответствующего транзистора. При этом транзисторы работают в режиме усиления класса А.

Повышение чувствительности радиоприемника прямого усиления достигается увеличением числа каскадов УРЧ (до детектора). Например, для этого можно построить радиоприемники $2-V-1$, $3-V-1$, $4-V-1$... и т. д. Однако с увеличением числа каскадов УРЧ возрастает вероятность самовозбуждения радиоприемника, устранить которое технически трудновыполнимо.

Увеличение числа каскадов УЗЧ повышает выходную мощность приемника и совершенно не влияет на его чувствительность.

Повышение избирательности радиоприёмника достигается увеличением числа фильтров - контуров, настроенных на частоту принимаемой станции. Эти контуры, как правило, включаются в качестве нагрузки резонансных каскадов. Однако с увеличением числа контуров, настроенных на одну и ту же частоту, вероятность самовозбуждения за счет паразитных обратных связей резко воз-

растает и, кроме того, это технически трудно осуществить, так как при перестройке селектора на прием другой станции необходимо заново настраивать все контуры приемника.

Высокой чувствительности и избирательности при минимальном числе контуров и усилительных каскадов в радиоприемниках прямого усиления можно достигнуть также применением положительной обратной связи в усилителе высокой частоты. Радиоприемники с положительной обратной связью называются *регенеративными радиоприемниками*. В регенеративных радиоприемниках для обратной связи используются импульсы высокочастотного напряжения, имеющиеся в продетектированном сигнале.

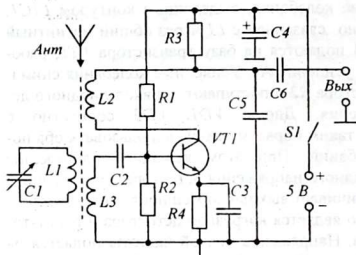


Рис. 7

Рассмотрим работу регенеративного радиоприемника θ - V - θ , схема которого представлена на рис. 7. В данной схеме имеется только один транзистор $VT1$, включенный по схеме базового детектора. С помощью делителя напряжения $R1R2$ на его базе устанавливается такое начальное напряжение, при котором в отсутствие входного сигнала базовый ток практически отсутствует. При наличии входного сигнала базовый ток будет воз-

никать только в положительные полупериоды, а в отрицательные - эмиттерный p - n -переход закрыт.

В цепи $L3 - C2$ - база - эмиттер - $C3$ - ШНП - $L3$ протекает пульсирующий ток (см. рис. 4. б). При прохождении каждого импульса конденсатор $C2$ заряжается, но постоянная времени цепочки $R2C2$ подбирается таким образом, чтобы к приходу следующего импульса конденсатор не успевал полностью разрядиться через резистор $R2$ и поэтому напряжение базы изменяется по некоторой ломанной, повторяющей закон изменения огибающей модулированного входного сигнала (см. рис. 4, в. г).

В коллекторном токе, повторяющем по форме базовый ток, имеются три составляющие: высокочастотная, постоянная и низкочастотная. При протекании коллекторного тока через катушку $L2$ вокруг нее создается переменное высокочастотное магнитное поле. И так как катушка связи $L2$ индуктивно связана с катушкой контура $L1$, в контур передается часть энергии высокочастотной составляющей коллекторного тока (обратная связь).

Если напряжение обратной связи совпадает по фазе с изменением напряжения в контуре, (что имеет место при положительной обратной связи), амплитуда колебаний в контуре возрастает, что равносильно увеличению уровня входного сигнала приемника, то есть, увеличению его чувствительности.

Высокочастотная составляющая коллекторного тока после катушки $L2$ замыкается через конденсатор $C5$, а на резисторе $R3$ формируется низкочастотное

напряжение, которое через конденсатор большой емкости C_6 подается на выход.

Цепочка $R4C3$ служит для термостабилизации режима работы транзистора и дает возможность увеличить сопротивление резистора $R2$, то есть, входное сопротивление приемника.

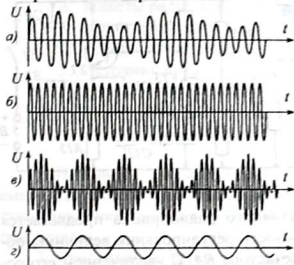


Рис. 8

Величина обратной связи обычно регулируется, например, приближением или удалением катушки $L2$ относительно катушки $L1$. Если величину положительной обратной связи довести до некоторого критического значения, то начинают выполняться условия самовозбуждения. Такое состояние называется пороговым.

Возникновение в контуре собственных колебаний приводит к появлению в схеме нежелательных явлений. Частота собственных колебаний контура может отличаться от частоты принимаемых сигналов. В результате сложения в транзисторе двух колебаний с различными частотами (рис. 8, а, б) возникают биения (рис. 8, в), которые после детектирования (рис. 8, г) прослушиваются на выходе приемника в виде неприятного свиста, гудения и т.п.

Кроме того, возникновение генерации приводит к тому, что схема из радиоприемника превращается в радиопередатчик, излучающий в пространство электромагнитные колебания высокой частоты, создающие помеху другим, работающим вблизи, радиоприемникам. Поэтому при настройке приемника величину связи подбирают такой, чтобы приемник работал вблизи порога генерации, при котором он обеспечивает наибольшую чувствительность и громкость звучания. Однако работа радиоприемника в этом режиме крайне неустойчива и незначительные причины (скачок напряжения, питания, сотрясения, изменения температуры, влажности, давления и т.п.) могут сорвать работу приемника.

Имеются, так называемые, сверхрегенеративные радиоприёмники, в которых допускается работа при закритической величине обратной связи. Возникающие колебания в нем периодически срываются колебаниями напряжения отдельного генератора, работающего на ультразвуковой частоте ($30 \div 100$ кГц). Регенеративные радиоприемники, как и радиоприёмники прямого усиления, промышленностью не выпускаются и используются в основном в кружковой работе со школьниками и начинающими радиолюбителями.

2. Схемы исследования

В данной работе для исследования предлагаются три схемы радиоприемников прямого усиления: 1-V-1, 2-V-2 и регенеративный радиоприемник 0-V-0.

Схема радиоприемника 1-V-1 полностью совпадает со схемой, приведенной на рис. 6. В схеме предусмотрена возможность одновременного подключения двух головных телефонов (2 пары гнезд по горизонтали), либо одного те-

7. Повышая величину обратной связи (увеличением сопротивления R_4), наблюдать за изменением громкости звучания приемника. Если с увеличением величины связи громкость уменьшается, это означает, что в схеме осуществляется отрицательная обратная связь. Проверив влияние отрицательной обратной связи на работу приемника, переключить переключатель S_1 в верхнее положение, а движок переменного резистора R_4 – в крайнее левое положение. Довести обратную связь до критической и убедиться в самовозбуждении приемника по характерному шипению и свистам в головных телефонах.

8. Уменьшать обратную связь до тех пор, пока вновь не возобновится прием. Это и есть пороговый режим регенеративного радиоприема. Обратит внимание на изменение громкости при изменении величины обратной связи. Выключить питание. Разобрать схему.

6. Указания к отчету

Отчет должен содержать:

1. Наименование и цель работы.
2. Схемы детекторных радиоприемников.
3. Схемы радиоприемников прямого усиления $I-I-1$, $2-V-2$.
4. Схему регенеративного радиоприемника $0-V-0$.
5. Выводы об особенностях работы радиоприемника прямого усиления и регенеративного радиоприемника.
6. Ответы на контрольные вопросы.

7. Контрольные вопросы

1. Из каких основных частей состоит любой радиоприемник? Какие из них обязательные?
2. Что называется радиоприемником прямого усиления?
3. Как расшифровать структурную формулу радиоприемника $2-V-3$?
4. Что такое чувствительность радиоприемника и от чего она зависит?
5. Что такое полоса пропускания? Как связаны полоса пропускания и качество воспроизведения радиоприемника?
6. Что такое избирательность радиоприемника? Что влияет на избирательность радиоприемника?
7. Каковы основные недостатки радиоприемника прямого усиления?
8. Как увеличить чувствительность радиоприемника прямого усиления?
9. Как повысить избирательность радиоприемников прямого усиления?
10. В чем сущность работы регенеративного радиоприемника?
11. Почему регенеративные радиоприемники не получили широкого распространения?

8. Литература

1. Гершензон Е.М. и др. Радиотехника. / Учеб. пособ. для педвузов. – М.: Просвещение, 1986, с 210-221.
2. Борисов В.Г. Знай радиоприемник. - М.: ДОСААФ, 1985.

Понятие о телевидении

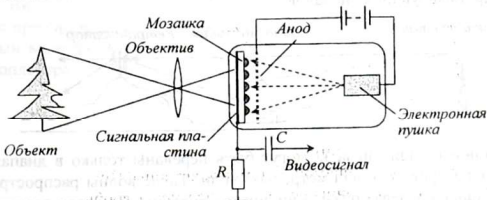
Принцип передачи изображений на расстояние состоит в следующем. На передающей станции производится преобразование изображения в последовательность электрических сигналов. Этими сигналами затем модулируют колебания, вырабатываемые генератором высокой частоты. Это – *телевизионный сигнал*. Телевизионный сигнал может передаваться с помощью кабеля или с помощью электромагнитных волн.

Модулированная электромагнитная волна переносит информацию на большие расстояния. В приёмнике производится обратное преобразование. Высокочастотные модулированные колебания детектируются, а полученный сигнал преобразуется в видимое изображение.

Для передачи движения используют *принцип кино*: немного отличающиеся друг от друга изображения движущегося объекта (кадры) передают десятки раз в секунду (в нашем телевидении 50 раз в секунду). Каждый кадр зритель рассматривает неподвижным, а, поскольку смена кадров происходит практически мгновенно, человек не замечает смены кадров: ему кажется, что он наблюдает один и тот же объект, который движется. Ввиду инерционности зрения человек воспринимает прерывистое движение как плавное и непрерывное.

В основе телевидения лежит принцип деления изображения на элементы (точки). Один телевизионный кадр содержит примерно полмиллиона элементов. Поэтому передать изображение означает – передать информацию о каждом элементе изображения. В информатике элементы изображения называются *пикселями*.

Сигнал изображения формируется с помощью видеокамеры, работающей по *принципу фотоаппарата*, только вместо светочувствительной фотопленки объектив проецирует изображение кадра на поверхность мозаичного экрана – *фотомишени*.



Мозаичный экран состоит из тонкой прозрачной пластинки слюды, одна сторона которой имеет сплошной проводящий слой из серебра. Причем, слой настолько тонкий, что пропускает свет (как в светозащитных очках). На другую поверхность пластинки набрызгиваются мельчайшие капельки серебра. Обра-

зовавшиеся крупинки серебра не касаются друг друга и электрически изолированы. Это слой называется *мозаикой*.

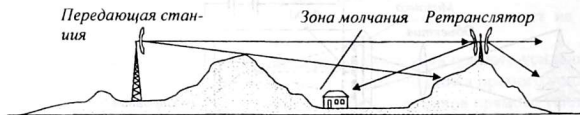
В видеокамере изображение кадра преобразуется в электрический сигнал с помощью передающей вакуумной электронной трубки - иконоскопа в серию электрических сигналов. Кроме иконоскопа, существуют и другие передающие устройства. Внутри иконоскопа расположен мозаичный экран, на который с помощью оптической системы (объектива) проецируется изображение объекта.

Свет проходит через полупрозрачное металлическое покрытие сигнальной пластины и попадает на мельчайшие крупинки серебра, образующие мозаику. Каждая крупинка образует с сигнальной пластиной микроконденсатор и за счет фотоэффекта заряжается положительно, причем величина заряда микроконденсатора зависит от интенсивности падающего на крупинку света. Таким образом, на мозаике создается невидимое электрическое изображение, в которой роль краски выполняет положительный заряд.

Заряженные микроконденсаторы (ячейки мозаики) разряжаются при попадании на них электронного луча, создаваемого электронной пушкой. Электронный луч последовательно попадает на все элементы сначала одной строчки мозаики, затем другой строчки и так далее (всего 625 строк). От того, насколько сильно меняется заряд ячейки, зависит сила тока в резисторе R . Поэтому напряжение на резисторе R изменяется пропорционально изменению освещенности вдоль строк кадра. Это - *видеосигнал*.

Такой же сигнал получается в телевизионном приемнике после детектирования. Он преобразуется в видимое изображение на экране приемной вакуумной электронной трубки - кинескопа. Электронная пушка такой трубки снабжена электродом, управляющим числом электронов в пучке и, следовательно, свечением экрана в месте попадания луча.

Системы катушек горизонтального и вертикального отклонения заставляют электронный луч обегать весь экран точно таким же образом, как электронный луч обегал мозаичный экран в передающей трубке. Синхронность движения лучей в передающей и приемной трубках достигается посылкой специальных синхронизирующих сигналов.



Телевизионные радиосигналы могут быть переданы только в диапазоне ультракоротких (метровых и дециметровых) волн. Такие волны распространяются обычно лишь в пределах прямой видимости антенны. При этом возникают зоны молчания, куда телевизионный сигнал не поступает вообще. Поэтому для охвата телевизионным вещанием большой территории необходимо размещать телепередатчики чаще и поднимать их антенны выше. Башня Останкинского телецентра в Москве высотой 540 м обеспечивает уверенный прием телепере-

дач в радиусе 120 км. В настоящее время телевизионная сеть в нашей Республике насчитывает несколько десятков вещательных станций; их передачи принимают около миллиона телевизоров.

Зона уверенного приема телевидения непрерывно увеличивается, особенно благодаря использованию ретрансляционных станций и спутников связи.

Для получения цветного изображения осуществляется передача трех видеосигналов, несущих компоненты изображения, соответствующие трём основным цветам (красный, зеленый, синий).

В цветном телевизоре кинескоп имеет три электронные пушки, управляемые сигналами интенсивности красного, зеленого и синего цвета. Все три электронных луча управляются одной отклоняющей системой и бомбардируют один и тот же экран.

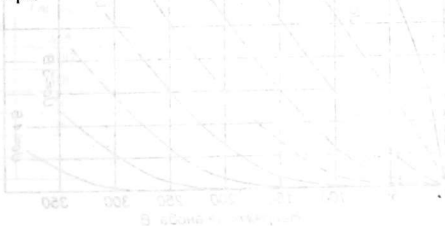
Экран имеет зернистое люминофорное покрытие, причем зёрна люминофоров, светящиеся красным, синим и зеленым цветом, равномерно распределены по экрану в строго определенном порядке, в каждой строке они расположены в последовательности: К – С – З – К – С – З – К – ... и так далее.



Электронные лучи ориентированы таким образом, что каждый луч попадает только на люминофоры соответствующего цвета. Например, электроны, испускаемые «красной» пушкой, попадают на люминофоры, светящиеся красным цветом, и создают на экране изображение, окрашенное красным цветом. Аналогично, две другие пушки создают то же изображение, но окрашенное соответственно в синий и зеленый цвета.

Человек, рассматривая три совмещенных изображения, воспринимает их как изображение одного реального объекта, окрашенного во все цвета радуги.

Видеосигнал может быть записан на магнитную ленту (видеокассета) или после преобразования в цифровую форму – на компакт-диск (диск DVD). Записанный видеofilm можно воспроизвести с помощью видеомagneтофона или видеоплеера.



СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

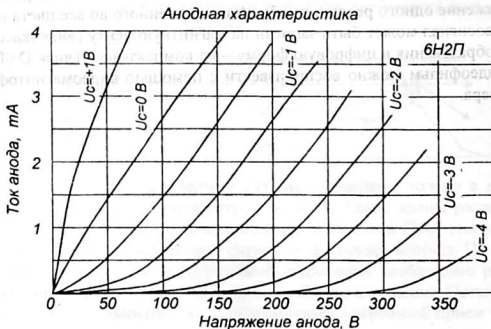
Основные параметры выпрямительных диодов (кенотронов)

Обознач. лампы	Количество анодов	Накал		Средн. значение выпрямленного тока, I_a , мА	Амплитуда обратного напряжения, $U_{обр}$, В	Среднее внутр. сопр. на один анод R_i , Ом
		U_n , В	I_n , А			
5Ц3С	2	5	3	250	1700	200
6Ц4П	2	6,3	0,6	75	1000	250
1Ц11П	1	1,2	0,2	2	20 кВ	20000
1Ж29Б	1	1,2	0,06	2	60 В	100

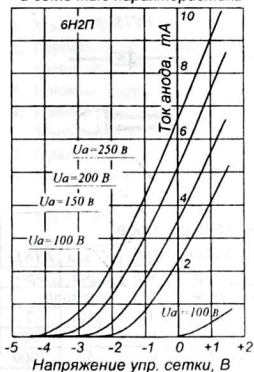
Электрические параметры вакуумных триодов

Лампы	Параметры лампы											
	U_n В	I_n мА	U_a В	U_c В	I_a мА	S мА/В	R_i кОм	μ	$C_{вх}$ пФ	$C_{вых}$ пФ	$C_{прот}$ пФ	$P_{a.доп}$ Вт
6Н2П	6,3	340	250	-1,5	2,3	2,1	50	100	2,35	2,5	0,7	1
6Н3П	6,3	350	150	-2	8,5	5,9	6,25	36	2,45	1,25	1,6	1,8
6Н15П	6,3	450	100	-0,5	9	5,6	6,8	38	2,0	0,45	1,4	1,6
6Н23П	6,3	310	100	-2	15	12,7	2,4	84	3,6	2,1	1,55	1,8
6Н24П	6,3	300	100	-2	15	12,5	2,4	33	3,9	2,0	1,3	1,8

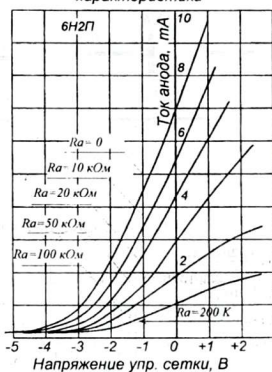
Вольтамперные характеристики триода 6Н2П



Статические анодно-сеточные и сеточные характеристики



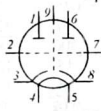
Динамические анодно-сеточные характеристики



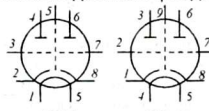
Расположение выводов пальчиковых ламп



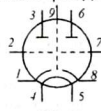
Цоколевка двойных триодов



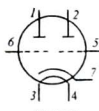
6Н2П, 6Н23П



6Н3П



6Н24П

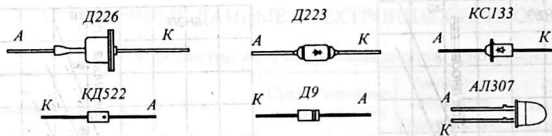


6Н15П

Справочные данные полупроводниковых диодов

Тип прибора	$I_{пр.ном}$, мА	$U_{пр.ном}$, В	$I_{пр.макс}$, А	$U_{обр.макс}$ ($U_{стаб}$), В	$I_{обр.макс}$, мА	$f_{макс}$, МГц
Д7Ж	300	0,5	1	400	0,1	0,03
Д226А	300	0,7	1	300	0,05	0,01
Д223А	50	0,7	0,5	200	0,02	20,0
Д2Е	16	1	50	100	0,25	0,15
Д814А	-	-	-	(8,0)	5	-
КС162А	-	-	-	(6,2)	10	-

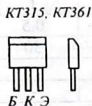
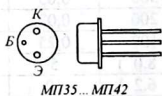
Цоколевка полупроводниковых диодов



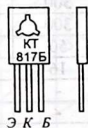
Справочные данные популярных транзисторов

Транзистор		МП37	МП40	МП42	КТ315	КТ817	
Структура транзистора		<i>n-p-n</i>	<i>p-n-p</i>	<i>p-n-p</i>	<i>n-p-n</i>	<i>n-p-n</i>	
Материал		германий			кремний		
Рабочая частота, МГц		1	1	1	250	3	
Режимы измерения	Ток эмиттера, мА	1	1	10	1	1000	
	Ток коллектора, мА	1	1	10	5	1000	
	Напряж. коллектора, В	5	5	5	10	30	
Параметры	Схема ОЭ	Коэффициент усиления	15-30	20-40	30-60	50-250	25
		Входное сопротивление, Ом	1000	700	1200	2500	-
		Выходное сопротивление, Ом	10-20	7-15	5-10	500	-
	Схема ОБ	Коэффициент усиления	0,96	0,96	0,98	0,98	-
		Входное сопротивление, Ом	50	25	25	200	-
		Выходное сопротивление, Ом	300	300	300	300	-
Предельные параметры	Напряжение коллектор-база, В	15	10	10	30	60	
	Напряжение коллектор-эмит., В	15	15	15	20	60	
	Постоянный ток коллектора, А	0,02	0,03	0,04	0,1	3	
	Ток коллектора в импульсе, А	0,15	0,15	0,2	0,2	5	
	Рассеиваемая мощность, Вт	0,15	0,15	0,2	0,15	25	
Диапазон рабочих температур, °С		от	- 55	- 20	- 20	- 50	- 50
		до	+ 85	+ 85	+ 85	+ 100	+ 120

Цоколевка транзисторов



КТ815... КТ819



ЛИТЕРАТУРА

1. Манаев Е.И. Основы радиоэлектроники. – М.: Радио и связь, 1985.
2. Гершензон Е.М. и др. Радиотехника учеб. пособие для педвузов - М.: Просвещение, 1986.
3. Изюмов Н.М., Линде Д.П. Основы радиотехники. - М.: Гос. энерг. изд., 1959.
4. Павлов В.Н., Ногин В.Н. Схемотехника аналоговых электронных устройств. Учебник для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001.
5. Прянишников В.А. Электроника: Курс лекций – СПб: Корона принт, 2000.
6. Молчанов А. П., Занадворов П. Н. Курс электротехники и радиоэлектроники. – М.: Наука, 1978.
7. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм. Учеб. пособие. – М.: Высш. школа, 1983.
8. Данилов И. А, Иванов П. М. Общая электротехника с основами электроники. Электроника. Программированное учебное пособие. – М.: Высшая школа, 1983.
9. Евсюков А. А. Электронное оборудование по физике. Пособие для учителей. – М.: Просвещение, 1977.
10. Винокуров В.И., Каплин С.И., Петелин И.Г. Электрорадиоизмерения: Учеб. пособие для радиотехн. спец. вузов / Под ред. В. И. Винокурова. – 2-е изд. – М.: Высш. шк., 1986.
11. Котур В.И. и др. Электрические измерения и электроизмерительные приборы: Учебник для техникумов / В.И.Котур и др. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
12. Халиуллин Р.Н. Лабораторный практикум по радиотехнике и радиоэлектронике. Часть I. Электронные приборы и усилители. Ош, 1991.
13. Халиуллин Р.Н., Саримсаков А.А. Лабораторный практикум по радиотехнике и радиоэлектронике. Часть 2. Генерирование и преобразование электрических сигналов. Ош, 1995.
14. Борисов В.Г. Знай радиоприемник. - М.: ДОСААФ, 1985.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. Электрические измерения	4
2. Исследование простых цепей переменного тока	14
3. Измерение индуктивностей и емкостей резонансными методами ...	20
4. Исследование работы электровакуумного диода	27
5. Снятие и анализ статических характеристик вакуумного триода ...	34
6. Исследование полупроводниковых диодов	43
7. Исследование работы биполярного транзистора	52
8. Изучение устройства и работы электронно-лучевой трубки	59
9. Радиоизмерения с помощью электронного осциллографа	69
10. Исследование резисторного усилителя напряжения на биполярном транзисторе	81
11. Исследование резонансного усилителя	90
12. Исследование полосового усилителя	96
13. Исследование <i>LC</i> - и <i>RC</i> -генераторов	104
14. Изучение релаксационных генераторов	115
15. Изучение импульсных генераторов	121
16. Изучение амплитудной модуляции	131
17. Изучение процессов детектирования	139
18. Изучение распространения электромагнитных волн вдоль длинной линии	146
19. Изучение направленных свойств антенн	157
20. Изучение работы радиоприёмника прямого усиления	168
Приложение 1 Понятие о телевидении	177
Приложение 2. Справочные данные электронных приборов	180
Литература	183

Подписано в печать:

Формат: 60x84 1/16
Заказ: №

Объем: 11,5 п.л.
Тираж: 200 экз.

ОшГУ, Редакционно-издательский отдел «Билим»
г.Ош, ул.Ленина, 331, каб.135. Тел.: 72061.

БИБЛИОТЕКА

Омского государственного университета

ИНВ. №

130-007



934176