

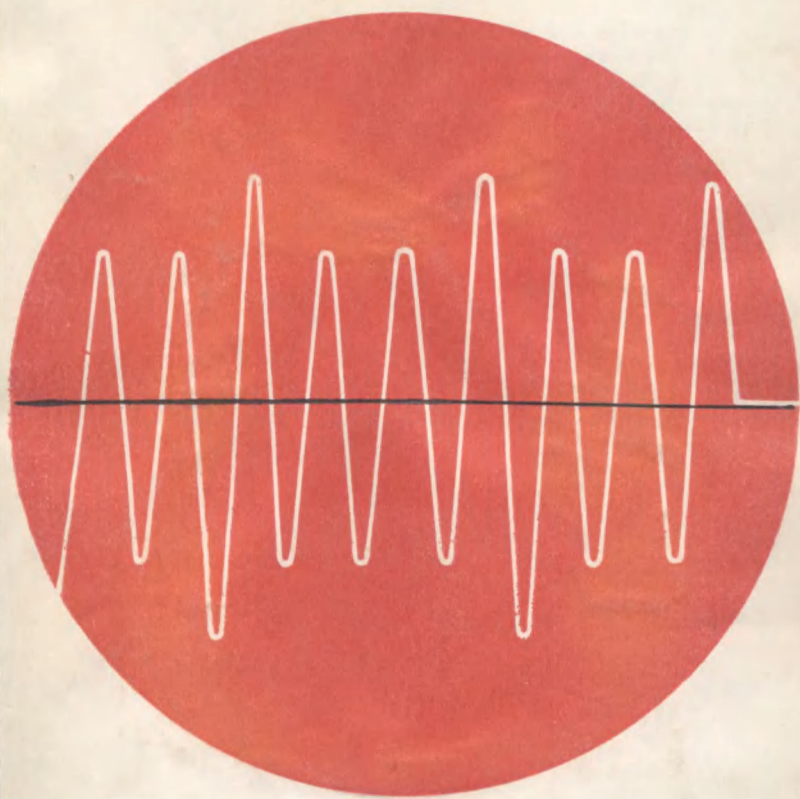
ПРОФТЕХОБРАЗОВАНИЕ



РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

Г. Б. Толкачев

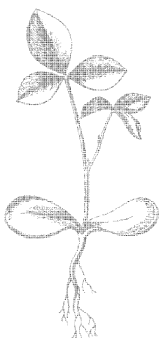
ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО РАДИО- ЭЛЕКТРОНИКЕ



Г. Б. Толкачев

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО РАДИО- ЭЛЕКТРОНИКЕ

Одобрено Ученым советом
Государственного комитета
Совета Министров СССР
по профессионально-техническому
образованию в качестве учебного
пособия для средних
профессионально-технических
училищ



МОСКВА „ВЫСШАЯ ШКОЛА“, 1978

ББК 32
Т52

Со всеми замечаниями и предложениями просим обращаться по адресу: *Москва, К-51, ул. Неглинная, 29/14, издательство «Высшая школа».*

- Толкачев Г. Б.**
Т52 Лабораторные работы по радиоэлектронике: Учеб. пособие для сред. проф.-техн. училищ.— М.: Высш. школа, 1978.— 190 с., ил. (Профтехобразование. Радиоэлектроника).

20 к.

Пособие содержит описание 34 лабораторных работ, составленных по программе курса «Радиоэлектроника», изучаемого в средних профессионально-технических училищах. В каждой работе приведены теоретические сведения и расчетные соотношения, методические указания по ее выполнению, список необходимых приборов и оборудования, а также контрольные вопросы.

Т 30407—232 55—78
052(01)—78

ББК 32
6Ф

©Издательство «Высшая школа», 1978

ПРЕДИСЛОВИЕ

В учебных программах для средних профессионально-технических училищ важная роль отведена лабораторным работам, которые помогают учащимся лучше усвоить пройденный материал, закрепить теоретические знания, приобрести практические навыки и использовать сведения, полученные при изучении смежных дисциплин.

В тематическом плане и учебной программе по подготовке рабочих электроэнергетических профессий одно из главных мест занимает изучение радиоэлектроники. Планом развития народного хозяйства СССР на 1976—1980 годы намечено широкое внедрение в промышленность технологических процессов, применение систем контроля за качеством продукции, оснащение производства современной быстродействующей электронно-вычислительной техникой и радиоэлектронной аппаратурой. Выпуск приборов и средств автоматизации за пятилетку должен быть увеличен в 1,6—1,7 раза. Это ставит серьезные задачи по подготовке квалифицированных специалистов для радио- и электронной промышленности.

При выполнении лабораторных работ учащиеся учатся работать с электроизмерительными приборами, применять элементы радиоэлектронной техники, читать электрические и радиоэлектронные схемы. На этих занятиях учащиеся используют знания, полученные при изучении разделов «Электричество» курса физики, «Элементарные функции» курса математики, «Цепи постоянного и переменного тока» курса электротехники.

Для проведения лабораторных работ необходимо оборудовать рабочие места в соответствии с количеством учащихся примерно из расчета два-три человека на одну работу. Каждая лабораторная работа проводится на специальном стенде, на котором смонтировано устройство, подлежащее исследованию. На лицевую панель стенда нанесена принципиальная схема устройства, с выведенными клеммами для подключения измерительных приборов и органами управления. На ли-

цевой панели размещены также розетки для подключения приборов от сети 220 В, 50 Гц. Электропитание стенда осуществляется от общего распределительного щита. Подавать напряжение на стенд имеет право только ответственный за лабораторное помещение. Напряжение на исследуемую схему подают с помощью автоматического выключателя установленного внутри каждого стенда так, что его кнопки управления выходят на лицевую панель, где установлена красная лампочка, загорающаяся при появлении напряжения.

Если в училище невозможно оборудовать отдельную лабораторию, работы можно проводить в кабинете, предназначенном для теоретического обучения. В этом случае лабораторные стенды должны быть выполнены таким образом, чтобы их можно было закреплять на стене класса или размещать на столе. Примером таких стендов могут служить наглядные пособия (планшеты), изготавливаемые опытным заводом Всесоюзного треста производственных предприятий при Государственном комитете Совета Министров СССР по профессионально-техническому образованию.

Рекомендуется выполнять лабораторные работы сразу после прохождения теоретического материала. Если училище недостаточно оснащено оборудованием или если мало помещение для лабораторных работ, можно проводить работы по разной тематике. В этом случае учащиеся поочередно выполняют необходимый цикл работ.

Лабораторные работы, подлежащие обязательному выполнению, должны быть утверждены методической комиссией и руководством профессионально-технического училища. График выполнения лабораторных работ составляет заместитель директора училища по учебно-производственной работе совместно с преподавателем электроники. Все учащиеся должны быть заранее ознакомлены с этим графиком и последовательностью, с которой каждый из них будет выполнять ту или иную работу.

Глава первая

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Прежде чем приступить к проведению лабораторной работы, преподаватель должен проверить, как усвоили учащиеся соответствующий раздел теоретического курса, а также наличие у них рабочей тетради с планом проведения работы, схемой и таблицами измерений. Следует отметить, что выяснять степень усвоения учащимися теоретического курса целесообразно методом программированного контроля, так как в этом случае значительно сокращается время опроса.

После того как преподаватель разрешит выполнять лабораторную работу, один из членов бригады получает измерительные приборы и размещает их на стенде. Затем, убедившись, что стенд обесточен, учащиеся подключают приборы к исследуемой схеме, устанавливая на них наивысшие пределы измерения и выбирая необходимый режим работы. Собранный стенд должен быть проверен преподавателем и только после этого включают стенд.

В процессе выполнения рабочего задания учащиеся проводят необходимые измерения и расчеты и заносят результаты измерений в таблицы. Окончив работу, учащиеся показывают полученные данные преподавателю, который дает разрешение на выключение стенда. После снятия напряжения со стенда учащиеся отключают измерительные приборы и сдают их в хранилище.

Итогом лабораторного занятия должен быть составленный учащимися отчет. Форма отчета устанавливается преподавателем и должна быть единой.

Техника безопасности при выполнении лабораторных работ. Стенды и оборудование лабораторных помещений должны быть выполнены так, чтобы токоведущие части были недоступны для случайного прикосновения. Прежде чем приступать к выполнению лабораторных работ, учащиеся должны изучить правила техники безопасности,

пользуясь специальным пособием или соответствующей литературой.

При выполнении лабораторной работы следует строго соблюдать эти правила, чтобы избежать поражения электрическим током.

Прежде чем производить какие-либо изменения в схеме, ее нужно отключить от источника электрической энергии. Подсоединять измерительные приборы можно только при отключенном стенде. Измерительную аппаратуру надо размещать на стенде так, чтобы был свободный доступ ко всем органам регулировки и управления; провода, соединяющие приборы и схему, не должны быть перекручены и натянуты.

При повреждении или ненормальной работе схемы и измерительной аппаратуры (например, при появлении запаха гари, дыма, внезапном зашкаливании приборов) следует немедленно снять напряжение со стенда. О всех случаях ненормальной работы стенда или нарушении правил техники безопасности учащиеся должны сообщать преподавателю.

В помещении для лабораторных занятий должна быть аптечка, а учащиеся должны уметь оказывать первую помощь пострадавшему от электрического тока.

Инструктаж по технике безопасности проводится преподавателем и должен быть зафиксирован в журнале, где каждый учащийся обязан расписаться.

Глава вторая

ЭЛЕКТРОННЫЕ, ИОННЫЕ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

Работа № 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ

Цель работы — ознакомиться с основными параметрами германиевых и кремниевых диодов и снять их вольт-амперные характеристики.

Пояснения. Наиболее широкое распространение получили в промышленности полупроводниковые вентиля — германиевые и кремниевые диоды. Вольт-амперная характеристика полупроводникового диода (рис 1) имеет две ветви: прямую, расположенную в первом квадранте и соответствующую проводящему направлению диода, и

обратную, расположенную в третьем квадранте и соответствующую непроводящему направлению.

Характеристики германиевого и кремниевого диодов показаны на рис. 2, а и б. Прямая ветвь характеризуется допустимым средним значением прямого тока $I_{пр.доп}$, который лимитируется допустимым нагревом перехода, и максимальным прямым падением напряжения $U_{пр.макс}$, соответствующим максимальному значению среднего тока. Обратная ветвь характеризуется допустимым обратным напряжением $U_{обр.доп}$, которое выбирается меньше пробивного напряжения $U_{проб}$ с необходимым запасом, и максимальным обратным током $I_{обр.макс}$, соответствующим $U_{доп}$ и определенным при 20°C .

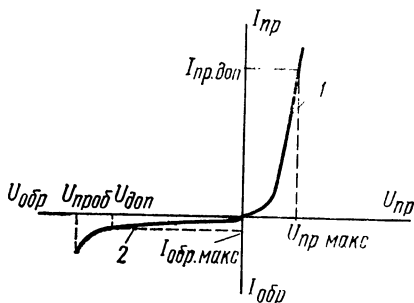


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика полупроводникового диода:
1 — прямая ветвь, 2 — обратная

Иногда оказывается удобным характеризовать свойства диода при прямом и обратном включении значениями сопротивлений по постоянному и переменному току. Сопротивление по постоянному току определяется как отно-

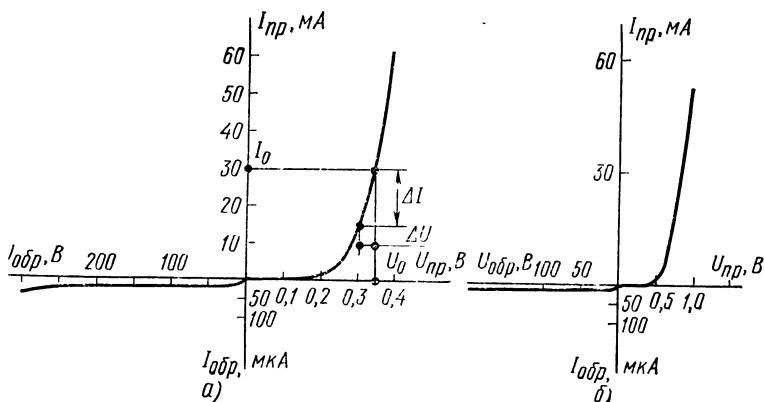


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики диодов:
а — германиевого, б — кремниевого

шение напряжения к току в данной точке вольт-амперной характеристики (рис. 2, а)

$$R_0 = U_0 / I_0.$$

при заданном значении I_0 или U_0 .

Динамическое сопротивление (сопротивление по переменному току, или дифференциальное)

$$R_i = \Delta U / \Delta I,$$

где приращения напряжения ΔU и тока ΔI отсчитываются от точки вольт-амперной характеристики, в которой сопротивление определяется.

Эти параметры служат для оценки свойств диодов с точки зрения их использования в низкочастотных преобразователях тока и напряжения. Следует отметить, что параметры полупроводниковых приборов в значительной степени зависят от температуры. Так, для германиевых диодов в диапазоне температур от 20 до 70° С можно считать, что увеличение температуры на каждые 10° С приводит к удвоению обратного тока. Что касается прямого напряжения, то для германиевых и кремниевых диодов на каждые десять градусов роста температуры прямое напряжение уменьшается на 15—20 мВ.

Оборудование и аппаратура

Блок питания постоянного тока с выходным напряжением от 0 до 60 В при токе нагрузки до 100 мА (Б5-9)	1 шт.
Вольтметр V_1 постоянного тока с пределом измерения 1 В (М206 или комбинированный Ц4311)	1 »
Миллиамперметр mA_1 постоянного тока с пределом измерения 50 мА (М330 или комбинированный Ц4311)	1 »
Микроамперметр $мкА$ постоянного тока с пределом измерения 50 $мкА$ (М220 или Ц4311)	1 »
Вольтметр V_2 постоянного тока с пределом измерения 75 В (М330 или Ц4311)	1 »
Резистор R_1 (МЛТ-2-620 Ом $\pm 5\%$)	1 »
Полупроводниковые диоды Д7Ж и Д226	2 »
Галетный переключатель $П_1$ на два положения и три направления	1 »
Тумблер $П_2$ (ТВ-2-1)	1 »

Порядок выполнения работы

1. Рассчитать сопротивления по постоянному току $R_{опр}$ и динамические сопротивления $R_{iпр}$ при прямом

включении диодов, вольт-амперные характеристики которых показаны на рис. 2, в точке $I_{пр}=30$ мА.

2. Рассчитать сопротивления по постоянному току $R_{обр}$, для обратной ветви диодов по характеристикам, показанным на рис. 2, в точке $U_{обр}=30$ В.

3. Подключить к схеме для исследования диодов (рис. 3) необходимую аппаратуру, соблюдая указанную полярность.

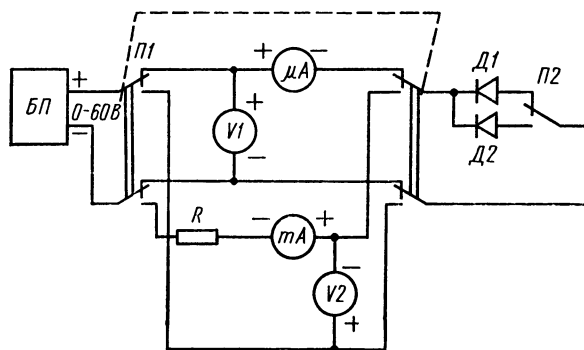


Рис. 3. Схема исследования полупроводникового диода

4. Снять прямую и обратную характеристики германиевого диода и занести показания в табл. 1 (ток через диод изменяют регулированием выходного напряжения блока питания; интервалы и диапазоны изменения прямого тока и обратного напряжения указаны в табл. 1).

Таблица 1. Вольт-амперная характеристика германиевого диода

Прямая ветвь		Обратная ветвь	
$U_{пр}$, В	$I_{пр}$, мА	$U_{обр}$, В	$I_{обр}$, мкА
	5	10	
	10	20	
	·		
	·	30	
	35	60	

5. Снять прямую и обратную характеристики кремниевого диода и занести показания в табл. 2 при тех же значениях прямого тока и обратного напряжения, которые указаны в табл. 1.

Таблица 2. Вольт-амперная характеристика кремниевого диода

Прямая ветвь		Обратная ветвь	
$U_{пр}$, В	$I_{пр}$, мА	$U_{обр}$, В	$I_{обр}$, мкА

6. По результатам измерений построить на одном графике вольт-амперные характеристики германиевого и кремниевого диодов, выбрав соответствующие масштабы по осям для первого и третьего квадрантов.

7. Определить по построенным характеристикам прямые сопротивления диодов по постоянному току $R_{0пр}$ и их динамические сопротивления $R_{iпр}$ в прямом включении при токе $I_{пр}=30$ мА. Сравнить полученные значения с расчетными (они могут отличаться на $\pm 20\%$).

8. Устно или письменно (по указанию преподавателя) сделать сравнительный анализ построенных характеристик.

Содержание отчета

1. Наименование отчета.
2. Название и технические данные использованных измерительных приборов.
3. Схема для исследования характеристик диодов.
4. Расчетные и экспериментально определенные значения параметров диодов.
5. Табл. 1 и 2 с результатами измерений.
6. Построенные вольт-амперные характеристики для германиевого и кремниевого диодов, исследованных в работе.

Контрольные вопросы

1. Какими параметрами характеризуются прямая и обратная ветви вольт-амперной характеристики диода?
2. Какими преимуществами обладают кремниевые диоды по сравнению с германиевыми?

3. Какие диоды — кремниевые или германиевые имеют меньшее прямое напряжение при одном и том же токе?

4. Как зависит прямое напряжение на диоде от температуры?

5. Что называется сопротивлением диода по постоянному току, а что динамическим сопротивлением?

6. Как зависит обратный ток германиевого диода от температуры?

Работа № 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ВАКУУМНОГО ТРИОДА

Цель работы — ознакомиться с основными параметрами трехэлектродной лампы — триода и снять статические анодные и анодно-сеточные характеристики.

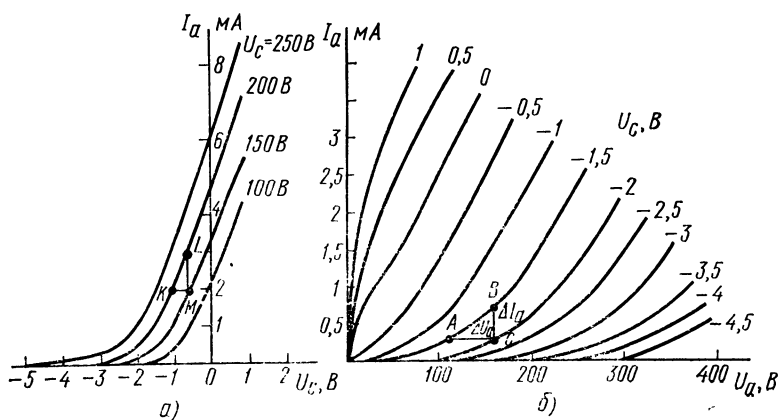


Рис. 1. Характеристики триода:

а — анодно-сеточные, б — анодные

Пояснения. Зависимость между анодным U_a и сеточным U_c напряжениями, определенными относительно катода, и анодным током I_a может быть выражена как аналитически, так и графически. Наиболее широкое распространение получили анодно-сеточные и анодные графические характеристики триода.

Анодно-сеточные характеристики представляют собой зависимости анодного тока I_a от сеточного напряжения U_c при постоянном напряжении на аноде (рис. 1, а), а анодные — анодного тока I_a от анодного напряжения U_a при заданном сеточном напряжении U_c (рис. 1, б). Семейство анодных характеристик можно построить, зная семейство анодно-сеточных и наоборот.

По этим характеристикам, построенным в определенном масштабе, можно определить основные параметры триода: внутреннее сопротивление R_i , крутизну характеристики S и статический коэффициент усиления напряжения μ .

Внутреннее (динамическое) сопротивление определяют по формуле

$$R_i = \Delta U_a / \Delta I_a \text{ при } U_c = \text{const},$$

где ΔI_a — приращение (изменение) анодного тока, вызванное изменением анодного напряжения ΔU_a . Его можно определить по анодным характеристикам триода, построив характеристический треугольник ABC (см. рис. 1, б).

Крутизна характеристики — это отношение изменения анодного тока к изменению сеточного напряжения при постоянном анодном напряжении:

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

и ее можно определить по анодно-сеточным характеристикам из треугольника KLM , показанного на рис. 1, а.

Статический коэффициент усиления — это отношение изменения анодного напряжения к вызвавшему его изменению сеточного напряжения при заданном токе анода:

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

и его можно определить как по анодным, так и по анодно-сеточным характеристикам. Кроме того, коэффициент усиления μ можно найти по внутреннему сопротивлению триода и его крутизне:

$$\mu = R_i S.$$

Следовательно, если известны два любых параметра, легко получить третий при условии, что их определяют при одном и том же режиме лампы.

Оборудование и аппаратура

Вольтметр $V1$ постоянного тока с пределом измерения 15 В (М330 или прибор Ц4311)	1 шт.
Вольтметр $V2$ постоянного тока с пределом измерения 300 В (М330 или прибор Ц4311)	1 »
Миллиамперметр постоянного тока с пределом измерения 100 мА (М330 или прибор Ц4311)	1 »

Источник питания цепей триода (УИП-2, УИП-1, или ВУП-1)	1 шт.
Триод (6Н2П)	1 »
Потенциометр R (РПШ-0,2-5 кОм)	1 »
Тумблер ТВ-2-1	1 »

Порядок выполнения работы

1. Рассчитать при $U_c = -2$ В и $U_a = 150$ В внутреннее сопротивление R_i , крутизну характеристики S и статический коэффициент усиления μ триода, пользуясь характеристиками, показанными на рис. 1.

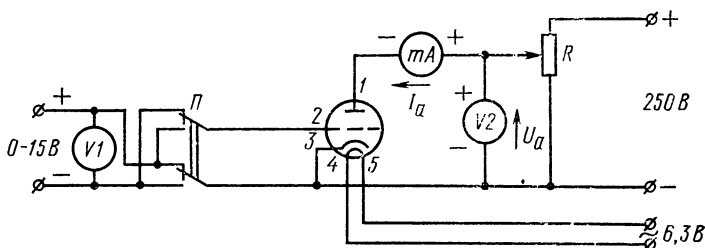


Рис. 2. Схема для исследования характеристик триода

2. Подключить согласно схеме исследования характеристик триода (рис. 2) измерительную аппаратуру и источник питания, установив его регуляторы в положения, соответствующие минимумам выходных напряжений.

3. Снять анодно-сеточные характеристики триода для значений анодного напряжения, указанных в табл. 1, и

Таблица 1. Анодно-сеточные характеристики триода

U_c , В	Анодный ток триода I_a , мА при			
	$U_a = 200$ В	$U_a = 150$ В	$U_a = 100$ В	$U_a = 50$ В
-12				
-10				
-8				
-6				
-4				
-2				
0				
+1				
+2				

результаты занести в эту же таблицу. Нулевые и положительные напряжения на сетку можно подавать только на короткое время, необходимое для измерения. Анодно-сеточные характеристики снимают, начиная с максимального отрицательного напряжения на сетке, при котором практически отсутствует ток анода. Постоянство анодного напряжения поддерживают потенциометром R .

4. Снять анодные характеристики при напряжениях на сетке, указанных в табл. 2, изменяя анодное напряжение от 25 до 200 В, определить и записать в эту таблицу значения анодных токов.

Т а б л и ц а 2. Анодные характеристики триода

U_a , В	Анодный ток триода I_a , мА при		
	$U_c = 0$ В	$U_c = -2$ В	$U_c = -4$ В
25			
50			
75			
100			
125			
150			
200			

5. По результатам измерений построить семейства анодно-сеточных и анодных характеристик и, используя их, определить при $U_c = -2$ В и $U_a = 150$ В внутреннее сопротивление R_i , крутизну характеристики S , статический коэффициент усиления μ .

7. Сравнить расчетные и экспериментально определенные параметры триода, учитывая, что они могут отличаться на $\pm 20\%$.

Содержание отчета

1. Наименование отчета.
2. Название и технические данные использованных измерительных приборов.
3. Схема исследования триода с подключенными измерительными приборами.
4. Соотношения, использованные в работе, и значения расчетных и экспериментально определенных параметров.

5. Табл. 1 и 2 с результатами измерений.
6. Построенные графики анодных и анодно-сеточных характеристик триода.

Контрольные вопросы

1. Что называется анодно-сеточной и анодной характеристиками триода и при каких условиях их определяют?
2. Как определяют коэффициент усиления триода по крутизне его характеристики и внутреннему сопротивлению?
3. Чем объяснить, что изменения сеточного напряжения вызывают изменения анодного тока более эффективно, чем изменения анодного напряжения?
4. Каковы основные параметры триода?

Работа № 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕНТОДА

Цель работы — ознакомиться с принципом действия, изучить статические анодные и анодно-сеточные характеристики и определить основные параметры пентода.

Пояснения. Пентод по сравнению с триодом имеет большую крутизну анодно-сеточной характеристики и намного большее внутреннее сопротивление по переменному току. Кроме того, у него отсутствует динаatronный эффект. Эти свойства пентода обусловлены наличием двух дополнительных сеток — экранирующей (второй) и защитной (третьей). В усилительных каскадах вторая сетка имеет по отношению к катоду значительный положительный потенциал, а третья сетка — нулевой (иногда эта сетка соединена с катодом внутри лампы).

Анодно-сеточные характеристики пентода выражают зависимость анодного тока I_a от напряжения на первой сетке при постоянных напряжениях на аноде U_a и второй сетке U_{c2} (рис. 1, а), а анодные — зависимость анодного тока I_a от анодного напряжения при заданных напряжениях на первой и второй сетках (рис. 1, б). На этом же графике часто показывают зависимость тока второй сетки I_{c2} от анодного напряжения U_a при постоянном напряжении на первой и второй сетках (пунктирные линии на рис. 1, б).

Семейство анодных характеристик можно построить, зная семейство анодно-сеточных характеристик и наоборот. По указанным характеристикам, построенным в определенном масштабе, можно определить основные параметры пентода:

внутреннее сопротивление по переменному току (по приращениям анодного напряжения и тока)

$$R_i = \Delta U_a / \Delta I_a \text{ при } U_{c1}, U_{c2} \text{ и } U_{c3} = \text{const};$$

крутизну анодно-сеточной характеристики, определяемую отношением изменения анодного тока к изменению напряжения на первой сетке,

$$S = \Delta I_a / \Delta U_{c1} \text{ при } U_a, U_{c2} \text{ и } U_{c3} = \text{const};$$

коэффициент усиления по напряжению

$$\mu = \Delta U_a / \Delta U_{c1} \text{ при } I_a, U_{c2} \text{ и } U_{c3} = \text{const}.$$

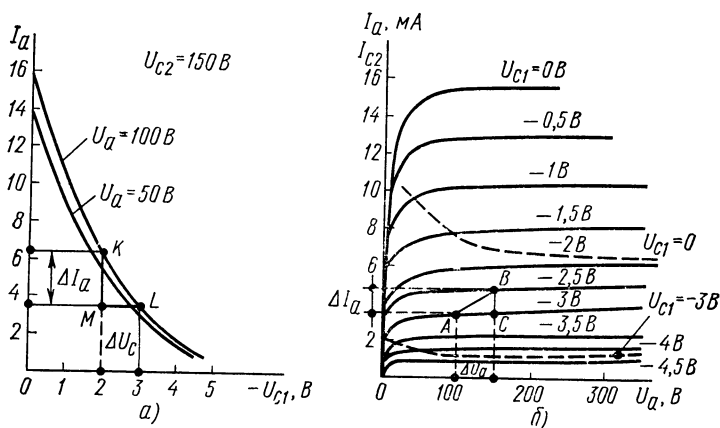


Рис. 1. Характеристики пентода:

а — анодно-сеточные, б — анодные

Внутреннее сопротивление R_i определяется по анодным характеристикам построением характеристического треугольника ABC (см. рис. 1). Крутизну характеристики S легче определить по анодно-сеточным характеристикам — треугольник KLM , а коэффициент μ — по анодным или анодно-сеточным характеристикам. Кроме того, известно, что для заданного режима лампы $\mu = SR_i$, т. е., если для заданного режима известны два любых параметра, легко определить третий.

Оборудование и аппаратура

Вольтметры постоянного тока $V1$ и $V2$ с пределами измерения 300 В (М330 или прибор Ц4311) . . .	2 шт.
Миллиамперметр постоянного тока $mA1$ с пределом измерения 30 мА (М330 или прибор Ц4311) . . .	1 »
Вольтметр постоянного тока $V3$ с пределом измерения 15 В (М330 или прибор Ц4311) . . .	1 »
Миллиамперметр постоянного тока $mA2$ с пределом измерения 15 мА (М330 или прибор Ц4311) . . .	1 »
Источник для питания цепей пентода (УИП-2, УИП-1 или ВУП-1) . . .	1 »
Ползунковые реостаты $R1$ и $R2$ (РПШ-0,2-5 кОм) . .	2 »
Ползунковый реостат $R3$ (РПШ-0,2-200 Ом) . . .	1 »
Пентод 6Ж4П ($S=6$ мА/В; $R_i=1$ МОм) . . .	1 »

Порядок выполнения работы

1. Подключить к исследуемому пентоду (рис. 2) источник питания и измерительные приборы, подготовив их для измерения соответствующих параметров и установив наивысшие пределы измерения комбинированных прибо-

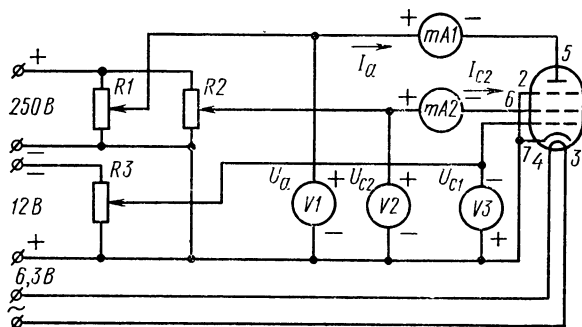


Рис. 2. Схема исследования пентода

ров. Потенциометры $R1$ и $R2$ поставить в нулевое положение. Включить блок питания и дать ему прогреться в течение 5 мин. Установить на экранной сетке напряжение 150 В.

2. Перенести на кальку справочные характеристики пентода, приведенные на рис. 1.

3. По переснятым характеристикам определить основные параметры пентода: R_i , S , μ при $U_a=100$ В и $U_{c1}=-3$ В.

4. Снять анодно-сеточные характеристики пентода для указанных в табл. 1 значений анодного напряжения, а результаты измерений занести в эту же таблицу. Анодно-сеточные характеристики снимают, начиная с максимального отрицательного напряжения на сетке, при котором отсутствует ток в цепи анода. Интервал изменения сеточного напряжения 1 В. Напряжение на экранной сетке постоянно и равно 150 В.

Т а б л и ц а 1. Анодно-сеточные характеристики пентода

$U_a=50$ В		$U_a=100$ В		$U_a=150$ В	
U_{c1} , В	I_a , мА	U_{c1} , В	I_a , мА	U_{c1} , В	I_a , мА

5. Снять анодные характеристики пентода для указанных в табл. 2 значений напряжения на первой сетке, а результаты измерений занести в эту же таблицу. Напряжение на второй сетке следует поддерживать неизменным.

Т а б л и ц а 2. Анодные характеристики пентода

$U_{c1}=0$ В			$U_{c1}=-2,5$ В			$U_{c1}=-3$ В		
U_a , В	I_a , мА	I_{c2} , мА	U_a , В	I_a , мА	I_{c2} , мА	U_a , В	I_a , мА	I_{c2} , мА
50			50			50		
75			75			75		
100			100			100		
125			125			125		
150			150			150		

6. По данным табл. 1 и 2 построить семейства анодных и анодно-сеточных характеристик пентода, а также зависимость тока второй сетки от напряжения на аноде.

7. Пользуясь построенными характеристиками, определить основные параметры пентода: R_i , S и μ при $U_a=100$ В и $U_{c1}=-3$ В.

Сравнить полученные значения параметров со справочными данными, приведенными в п. 2 (различие в параметрах может достигать 20%).

Содержание отчета

1. Наименование отчета.
2. Название и технические данные использованных измерительных приборов.
3. Схема исследования характеристик пентода с подключенными измерительными приборами.
4. Соотношения, используемые в работе и записанные значения расчетных и экспериментально определенных параметров R_i , S и μ .
5. Табл. 1 и 2 с результатами измерений.
6. Построенные графики анодной и анодно-сеточной характеристик пентода и зависимость тока второй сетки от напряжения на аноде.

Контрольные вопросы

1. Какие преимущества имеет пентод по сравнению с триодом и тетродом?
2. Сколько сеток в пентоде и как их называют?
3. Какова полярность напряжения на сетках пентода при его работе в усилительном каскаде?
4. Что называется анодно-сеточной характеристикой пентода и при каком условии ее снимают?
5. Каковы основные параметры пентода?

Работа № 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНЗИСТОРА

Цель работы — ознакомиться с основными параметрами транзистора и снять его статические входные и выходные характеристики.

Пояснения. Различают три основные схемы включения транзистора: с общим эмиттером ОЭ, общей базой ОБ и общим коллектором ОК. Название схемы зависит от того, какой из электродов является общим по переменному току для входных и выходных зажимов каскада, т. е. соединен по переменному току одновременно с входом и выходом схемы. Рассмотрим и исследуем наиболее распространенную схему включения транзистора прямой проводимости — с общим эмиттером. Эта схема благодаря своим достоинствам по сравнению со схемами с ОБ

и ОК широко используется в усилительных и импульсных каскадах.

Зависимость между токами и напряжениями электродов транзистора может быть выражена как аналитически, так и графически. В большинстве случаев при расчете и выборе режимов транзисторов, работающих в усилительных схемах, используют графический метод. Различают выходные и входные статические характеристики транзистора. Выходные характеристики выражают зависимость выходного тока от выходного напряжения при

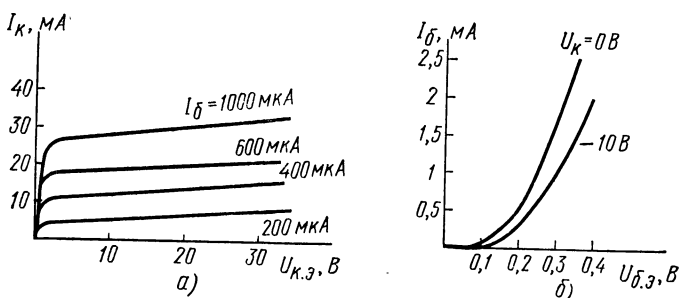


Рис. 1. Характеристики транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером:

а — выходные, б — входные

разных, но постоянных уровнях входного сигнала. Для схемы с ОЭ — это зависимость тока коллектора I_K от напряжения коллектор — эмиттер $U_{K,э}$ при различных уровнях токов базы (рис. 1, а). Входные характеристики выражают зависимость входного тока от входного напряжения при разных уровнях выходного напряжения. Для схемы с ОЭ — это зависимость тока базы $I_б$ от напряжения база — эмиттер $U_{б,э}$ при разных, но постоянных уровнях напряжения $U_{K,э}$ (рис. 1, б). По этим характеристикам, построенным в определенном масштабе, можно определить следующие параметры транзистора в схеме с ОЭ:

входное сопротивление $r_{вх} = \Delta U_{б,э} / \Delta I_б$ при $U_{K,э} = \text{const}$;

коэффициент усиления по току $\beta = \Delta I_K / \Delta I_б$ при $U_{K,э} = \text{const}$;

выходное сопротивление $r_{вых.ОЭ} = \Delta U_{K,э} / \Delta I_K$ при $I_б = \text{const}$.

Необходимо отметить, что параметры транзисторов зависят от режима работы, т. е. один и тот же параметр имеет различные значения для разных точек вольт-амперных характеристик.

Оборудование и аппаратура

Ламповый вольтметр $V1$ (ВК7-9)	1 шт.
Микроамперметр μA постоянного тока с пределом 1 мА (М330)	1 »
Вольтметр $V2$ постоянного тока с пределом измерения 30 В (М330 или прибор Ц4311)	1 »
Миллиамперметр mA постоянного тока с пределом измерения 30 мА (М330 или прибор Ц4311)	1 »
Стабилизатор напряжения постоянного тока с регулировкой выходного напряжения от 0 до 30 В при нагрузке до 50 мА	2 »
Транзистор T (МП26А)	1 »
Резисторы: $R1$ (МЛТ-1-6,2 кОм $\pm 5\%$)	1 »
$R2$ (МЛТ-2-1,1 кОм $\pm 5\%$)	1 »

Порядок выполнения работы

1. Перенести на кальку статические характеристики транзистора и рассчитать по ним при $I_6 = 400$ мкА и $U_{к.э} = -10$ В его основные параметры: входное сопротивление $r_{вх}$, выходное сопротивление $r_{вых}$ и коэффициент усиления по току β .

2. Подключить к исследуемому транзистору (рис. 2) источники питания и измерительные приборы, подготовив

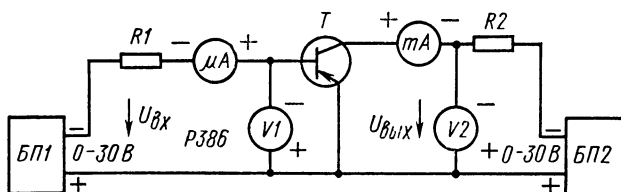


Рис. 2. Схема для исследования характеристик транзистора

их для измерения соответствующих параметров и установив наивысшие пределы измерения комбинированных приборов.

3. Снять семейство выходных характеристик транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, для

чего, регулируя выходное напряжение блока питания *БП1*, установить ток базы, равный 200 мкА. Изменяя напряжение коллектор — эмиттер транзистора интервалами в 1 В (регулируя выходное напряжение *БП2* от минимального до максимального значения) и поддерживая ток базы, равный 200 мкА, записать значения коллекторного тока в табл. 1. Выполнить подобные операции для других значений тока базы, указанных в табл. 1.

Таблица 1. Выходные характеристики транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером

$I_6 = 200 \text{ мкА}$		$I_6 = 400 \text{ мкА}$		$I_6 = 600 \text{ мкА}$		$I_6 = 1 \text{ мА}$	
$U_K, \text{ В}$	$I_K, \text{ мА}$	$U_K, \text{ В}$	$I_K, \text{ мА}$	$U_K, \text{ В}$	$I_K, \text{ мА}$	$U_K, \text{ В}$	$I_K, \text{ мА}$

4. Снять входные характеристики транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером для значений напряжения коллектор — эмиттер —1 и —10 В. Для чего, изменяя ток базы интервалами в 50 мкА, поддерживают неизменным (регулируя напряжение блока *БП2*) напряжение коллектор — эмиттер $U_{к.э}$, равное —1 В, а затем —10 В. Записать значения напряжения база — эмиттер $U_{б.э}$ в табл. 2.

Таблица 2. Входные характеристики транзистора в схеме с общим эмиттером

$U_{к.э} = -1 \text{ В}$		$U_{к.э} = -10 \text{ В}$	
$I_6, \text{ мкА}$	$U_{б.э}, \text{ мВ}$	$I_6, \text{ мкА}$	$U_{б.э}, \text{ мВ}$
100		100	
150		150	
200		200	
250		250	
300		300	
350		350	
400		400	
450		450	
500		500	
750		750	
1000		1000	

5. По результатам измерений (табл. 1 и 2) построить выходные и входные характеристики транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, и определить при $I_6=400$ мкА и $U_{к.э}=-10$ В входное сопротивление $r_{вх}$; коэффициент усиления по току β и выходное сопротивление $r_{вых. оэ}$.

6. Сравнить полученные значения параметров с расчетными, определенными в п. 1 (они могут отличаться на $\pm 20\%$).

Содержание отчета

1. Наименование отчета.
2. Название и технические данные использованных измерительных приборов.
3. Схема исследования транзистора с подключенными измерительными приборами.
4. Формулы, использованные в работе, и значения расчетных и экспериментально определенных параметров ($r_{вх}$, $r_{вых}$, β).
5. Табл. 1 и 2 с результатами измерений.
6. Входные и выходные характеристики транзистора.

Контрольные вопросы

1. Какого типа проводимостью обладают эмиттер, база и коллектор транзистора прямой и обратной проводимости?
2. В каком случае для заданного тока базы напряжение база — эмиттер больше: когда напряжение коллектор — эмиттер по абсолютной величине больше или меньше?
3. Какие схемы включения транзисторов вы знаете?
4. Что называется коэффициентом усиления по току для транзистора с общим эмиттером и при каком условии его определяют?

Работа № 5. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА

Цель работы — ознакомиться с устройством и принципом действия полевых транзисторов с электронно-дырочным переходом, снять основные характеристики полевого транзистора.

Пояснения. В полевых транзисторах рабочий ток между электродами обусловлен движением основных носителей зарядов одного знака (дырками или электронами) и по этой причине их иногда называют униполярными в отличие от обычных транзисторов, называемых биполяр-

ными, в которых важную роль при создании рабочего тока играют оба типа носителей.

Униполярные полевые транзисторы имеют несколько разновидностей. Рассмотрим только принцип действия и характеристики полевого транзистора с p - n -переходом и каналом p -типа (т. е. каналом, через который движутся основные носители — дырки, обладающим дырочной проводимостью). Конструкция такого полевого транзистора и схема его включения показаны на рис. 1.

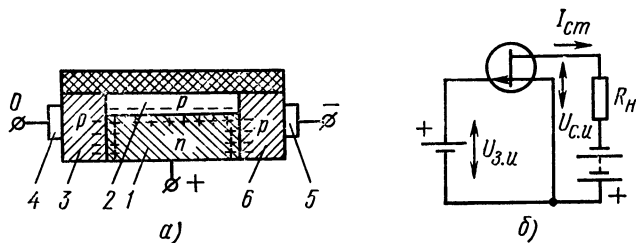


Рис. 1. Полевой транзистор:
а — конструкция, б — схема включений

Основой конструкции полевого транзистора с электронно-дырочным переходом является кремниевый зазор 1 электронной проводимости, в котором имеется тонкий канал 2 дырочной проводимости. Концы канала заканчиваются истоком 3 и стоком 6, которые также имеют дырочную проводимость, но меньшее удельное сопротивление, чем канал. Контакт с областями стока и истока обеспечивается электродами 4 и 5. Исток, сток, затвор и канал создают три p - n -перехода, главным из которых (рабочим) является переход между затвором и каналом.

Ток от истока к стоку обусловлен движением носителей зарядов (в данном случае дырками) вдоль канала, т. е. вдоль перехода (в биполярном транзисторе заряды двигаются через переходы). Проходящий по каналу ток образует ток стока, который зависит от напряжения между стоком и истоком и сопротивления канала, зависящего от напряжения между затвором и каналом.

Для нормальной работы напряжение затвор — канал (или затвор — исток) должно быть положительным, т. е. это обратное напряжение для p - n -перехода затвор — канал. При увеличении положительного напряжения на затворе происходит расширение p - n -перехода и канал су-

жается. При этом уменьшается поперечное сечение канала, через которое проходят дырки, и сопротивление канала возрастает, а ток стока уменьшается. С уменьшением положительного напряжения p - n -переход сужается и сопротивление канала уменьшается, а ток стока увеличивается. Поскольку p - n -переход канала — затвор работает при обратном включении (так же как и вспомогательные переходы), его сопротивление для входного сигнала велико, т. е. мал входной ток, и входная мощность мала.

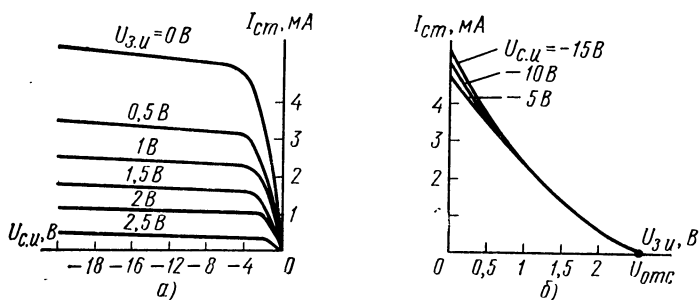


Рис. 2. Характеристики полевого транзистора с p - n -переходом и каналом p -типа:
а — выходные, б — переходные

Ток канала определяется питающим напряжением и сопротивлениями нагрузки и канала, которые в нормальном режиме много меньше сопротивления p - n -перехода при обратном включении. Следовательно, полезная мощность в нагрузке может значительно превышать входную мощность.

Таким образом, полевой транзистор является усиительным прибором, причем он имеет много общего с электронной лампой. Отметим основную особенность полевых транзисторов: они являются обратимыми приборами, т. е. у них исток и сток можно поменять местами, сохранив работоспособность.

Количественную связь между напряжениями сток—исток $U_{с.и}$ и затвор—исток $U_{з.и}$ обычно выражают графическими характеристиками, основные из которых это статические выходные и переходные характеристики. Выходные характеристики выражают зависимость тока стока от напряжения сток—исток при различных уровнях напряжения затвор—исток (рис. 2, а), а переходные — зави-

симось токa стока от напряжения затвор—исток при разных, но постоянных уровнях напряжения $U_{с.и}$ (рис. 2, б).

В справочной литературе приводятся также параметры полевых транзисторов:

$I_{ст.0}$ — ток стока (мА), соответствующий нулевому напряжению $U_{з.и}$ и заданному напряжению $U_{с.и}$;

S — крутизна характеристики тока стока (мА/В), определяемая при напряжении $U_{з.и}=0$ и заданном напряжении $U_{с.и}$ по формуле $S=\Delta I_c/\Delta U_{з.и}$ при $U_{с.и}=\text{const}$;

$U_{отс}$ — напряжение отсечки, т. е. напряжение $U_{з.и}$, при котором отсутствует ток стока.

Электрическая прочность полевых транзисторов оценивается по предельным эксплуатационным данным:

$U_{с.з.доп}$ — допустимое суммарное напряжение сток—затвор;

$U_{с.и.доп}$ — допустимое напряжение сток—исток;

$P_{\text{макс}}$ — максимальная рассеиваемая мощность;

$t_{\text{мин}}—t_{\text{макс}}$ — диапазон температур окружающей среды.

Оборудование и аппаратура

Вольтметр $V1$ постоянного тока с пределом измерения 3 В (М330 или прибор Ц4311)	1 шт.
Вольтметр $V2$ постоянного тока с пределом измерения 15 В (М330 или прибор Ц4311)	1 »
Миллиамперметр mA постоянного тока с пределом измерения 10 мА (М330 или прибор Ц4311)	1 »
Источник напряжения $БП1$ постоянного тока с регулируемым выходным напряжением от 0 до 5 В при токе до 5 мА	1 »
Источник напряжения $БП2$ постоянного тока с регулируемым выходным напряжением от 0 до 10 В при токе до 20 мА	1 »
Полевой транзистор T (КП103Л)	1 »
Резистор R (МЛТ-0,25-1 МОм $\pm 5\%$)	1 »
Полупроводниковые стабилитроны $D1$ и $D2$ (Д813)	2 »

Порядок выполнения работы

1. Рассчитать крутизну S переходной характеристики полевого транзистора по графикам, показанным на рис. 2, в точке $U_{с.и}=-10$ В, $U_{з.и}=1$ В.

2. Подключить к исследуемому полемому транзистору (рис. 3) стабилизаторы напряжения и измерительные приборы.

3. Снять выходные характеристики полевого транзистора с p - n -переходом и каналом p -типа. При снятии характеристик выходные напряжения блоков питания не должны превышать 10 В. Требуемые пределы измерений приборов устанавливаются в процессе исследования. Для снятия выходных характеристик следует установить напряжение затвор—исток, равное нулю. Изменяя напря-

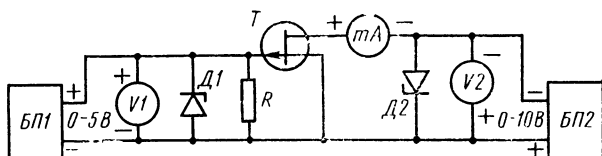


Рис. 3. Схема для исследования характеристик полевого транзистора

жение сток—исток интервалами в 1 В от 1 до 10 В, измерить значения токов стока и записать их в табл. 1. Выполнить подобные операции для других значений напряжения затвор — исток, указанных в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Выходные характеристики полевого транзистора

$U_{з.н} = 0 \text{ В}$		$U_{з.н} = 0,5 \text{ В}$		$U_{з.н} = 1 \text{ В}$		$U_{з.н} = 1,5 \text{ В}$		$U_{з.н} = 2 \text{ В}$	
$U_{с.н}, \text{ В}$	$I_{ст}, \text{ мА}$	$U_{с.н}, \text{ В}$	$I_{ст}, \text{ мА}$	$U_{с.н}, \text{ В}$	$I_{ст}, \text{ мА}$	$U_{с.н}, \text{ В}$	$I_{ст}, \text{ мА}$	$U_{с.н}, \text{ В}$	$I_{ст}, \text{ мА}$

4. Снять переходные характеристики полевого транзистора, для чего установить напряжение сток—исток, равное 10 В, и, изменяя напряжение затвор—исток интервалами в 0,5 В от 0 В до напряжения отсечки (когда ток стока уменьшится до 5—10 мкА), измерить значения тока стока и записать их в табл. 2. Выполнить подобные операции для напряжения сток — исток, равного 5 В.

Таблица 2. Переходные характеристики полевого транзистора

$U_{с.и} = -10 \text{ В}$		$U_{с.и} = -5 \text{ В}$	
$U_{з.и}, \text{ В}$	$I_{сг}, \text{ мА}$	$U_{з.и}, \text{ В}$	$I_{сг}, \text{ мА}$

5. По построенным характеристикам определить напряжение отсечки $U_{отс}$ и крутизну S переходной характеристики при напряжениях $U_{с.и} = -10 \text{ В}$, $U_{з.и} = 1 \text{ В}$. Сравнить полученное значение крутизны со значением, определенным в п. 1 (они могут отличаться на 10—20%).

Содержание отчета

1. Наименование отчета.
2. Название и технические данные использованных измерительных приборов.
3. Схема исследования характеристик полевого транзистора.
4. Формулы, использованные в работе, и значения расчетных и экспериментально определенных параметров.
5. Табл. 1 и 2 с результатами измерений.
6. Построенные выходные и переходные характеристики полевого транзистора.

Контрольные вопросы

1. Каким прибором является полевой транзистор: биполярным или униполярным?
2. Какими носителями зарядов обусловлен ток стока в полевом транзисторе с p - n -переходом и каналом p -типа: дырками или электронами?
3. Как определяют крутизну переходной характеристики полевого транзистора?
4. Какое напряжение в полевом транзисторе называется напряжением отсечки?

Работа № 6. ИССЛЕДОВАНИЕ ТИРИСТОРА

Цель работы — ознакомиться с вольт-амперными характеристиками и основными параметрами переключающих диодов — тиристоров.

Пояснения. Переключающий диод — тиристор представляет собой четырехслойную полупроводниковую структуру $p-n-p-n$ -типа, содержащую три $p-n$ -перехода. Тиристоры, имеющие выводы от крайних электродов, называются динисторами, а приборы с третьим выводом (от одного из средних электродов) — тринисторами *. Крайняя p -область выполняет в тиристоре функции анода, а крайняя n -область — функции катода. Электрод, соединенный с промежуточной p -областью, называют управляющим.

Вольт-амперные характеристики тиристоров показаны на рис. 1. Участок OA соответствует выключенному состоянию тиристора и характеризуется следующими параметрами:

$I_{ут}$ — ток утечки — прямой ток через тиристор при напряжении, равном половине напряжения $U_{вкл}$; $U_{вкл}$ — напряжение включения, при котором происходит переключение тиристора из закрытого состояния в открытое; $I_{вкл}$ — ток включения, соответствующий напряжению $U_{вкл}$ (точка A).

Вблизи точки A ток через тиристор изменяется значительно даже при небольшом увеличении напряжения. На участке AB дифференциальное сопротивление диода отрицательное. Поэтому, если последовательно с тиристором включено небольшое сопротивление, при выходе рабочей точки на участок AB (когда напряжение на тиристоре достигает напряжения $U_{вкл}$) она быстро переместится на участок BB , который характеризуется положительным дифференциальным сопротивлением. Таким образом происходит включение тиристора. Положение рабочей точки на участке BB будет определяться питающим напряжением и сопротивлением, включенным последовательно с тиристором. Этот участок характеризуется параметрами:

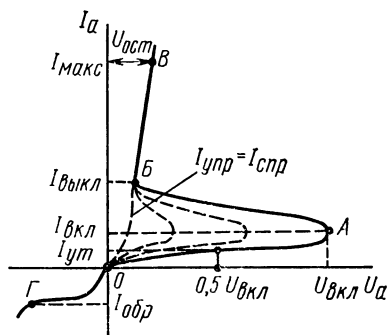


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика тиристора

* В технике их принято называть просто тиристорами.

$I_{\text{пр.макс}}$ — прямым максимальным током или средним допустимым,

$U_{\text{ост}}$ — остаточным напряжением, соответствующим $I_{\text{пр.макс}}$.

Тиристор будет находиться во включенном состоянии до тех пор, пока ток через него будет больше тока выключения $I_{\text{выкл}}$. При токе меньшем $I_{\text{выкл}}$ тиристор выключается.

В отличие от динисторов, у которых напряжение $U_{\text{вкл}}$ постоянно и не регулируется, напряжение включения тиристора можно изменять, подавая напряжение (или задавая ток) на управляющий электрод и катод прибора.

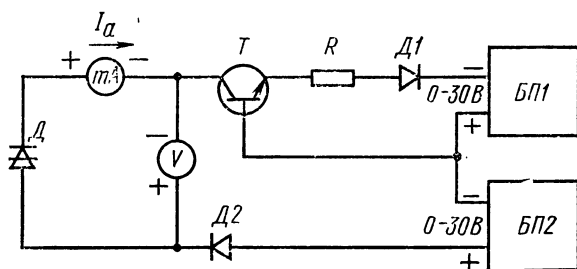


Рис. 2. Схема исследования динистора

Зависимость напряжения включения $U_{\text{вкл}}$ от тока управления $I_{\text{упр}}$ называется пусковой характеристикой тиристора (см. рис. 3, б). С увеличением тока в цепи управляющего электрода напряжение включения уменьшается, а вольт-амперная характеристика тиристора видоизменяется. Следует отметить, что мощность управляющего сигнала во много раз меньше мощности, управляемой тиристором.

На рис. 1 пунктирными линиями показаны вольт-амперные характеристики, соответствующие разным уровням тока управления. При некотором токе, называемом током спрямления $I_{\text{спр}}$, вольт-амперная характеристика тиристора представляет собой практически прямую линию, проходящую через точки О, Б, В. На этой характеристике отсутствует участок с отрицательным сопротивлением. Ток спрямления является важным параметром тиристора.

Для тириستоров указывают также параметры обратной ветви характеристики (участок ОГ). Например, чаще

всего указывают обратный ток утечки, $I_{обр}$, определенный при некотором обратном напряжении. Для некоторых типов тиристоров работа на обратном участке недопустима.

Наиболее широко тиристоры применяются в качестве управляемых вентилях для регулируемых бесконтактных выпрямителей с целью управления большой мощностью в нагрузке. Их также используют в схемах радиоэлектроники: счетчиках, логических устройствах, спусковых схемах и т. д. Схема исследования динистора показана на рис. 2. В этой схеме на транзисторе T собран источник

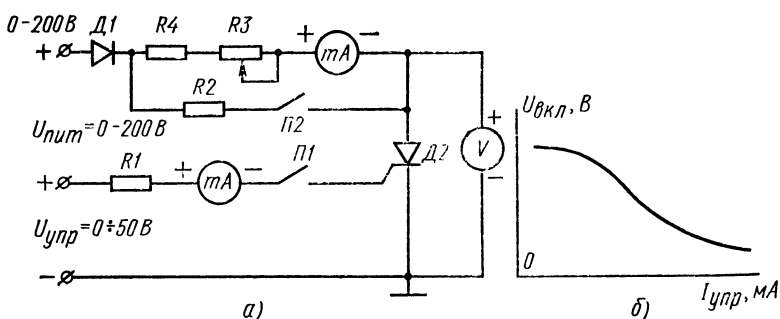


Рис. 3. Схема исследования тиристора (а) и его пусковая характеристика (б)

тока (см. далее лабораторную работу № 12), значение которого определяется напряжением блока питания БПИ; выходное сопротивление источника тока составляет примерно 2—3 МОм (имеется в виду динамическое выходное сопротивление). Эта схема необходима для снятия вольт-амперной характеристики динистора на участке, имеющем отрицательный наклон (участок AB на рис. 1). Если источник питания динистора имеет малое сопротивление, положение рабочей точки на участке AB неустойчиво и, следовательно, невозможно проследить ход кривой.

Схема, показанная на рис. 3, а, предназначена для снятия пусковой характеристики, измерения тока выключения и остаточного напряжения тиристора. Изменение прямого напряжения на тиристоре достигается регулировкой напряжения питания $U_{пит}$, регулировка тока через открытый тиристор — изменением сопротивления рези-

стора $R3$, а установка необходимого тока управления — изменением напряжения управления $U_{упр}$. Переключателем $П1$ производится размыкание цепи управления, а переключатель $П2$ используется при определении тока выключения. Резистор $R4$ ограничивает ток через открытый тиристор $D2$, а диод $D1$ предохраняет его при неправильном подсоединении источника питания.

Оборудование и аппаратура

Для исследования динистора (см. рис. 2)

Динистор D (КН102А) $U_{вкл}=20$ В, $U_{ост}=1,5$ В, $I_{ср. доп}=200$ мА	1 шт.
Резистор R (МЛТ-0,5-5,1 кОм $\pm 5\%$)	1 »
Стабилизированные источники питания $БП1$ и $БП2$ с регулируемым напряжением от 0 до 30 В при токе нагрузки до 30 мА	2 »
Ламповый вольтметр (ВЗ-13 или прибор Р386) . . .	1 »
Миллиамперметр mA постоянного тока с пределом из- мерения 5 мА (М330 или прибор Ц4311)	1 »
Полупроводниковые диоды $D1$ и $D2$ (Д226)	2 »

Для исследования тиристора (см. рис. 3, а)

Ламповый вольтметр V (например, ВЗ-13 или Р386) .	1 »
Комбинированный прибор Ц4311	2 »
Источник стабилизированного постоянного напряже- ния 0—200, 0—50 В (например, УИП-1, УИП-2) .	1 »
Резисторы: $R1$ (МЛТ-2-6,2 кОм $\pm 5\%$)	1 »
$R2, R4$ (ПЭ-15-6,2 кОм $\pm 5\%$)	2 »
$R3$ (СП-11—А620 кОм)	1 »
Тиристор $D2$ (КУ101А) $I_{выкл}=0,5\div 25$ мА, $U_{ост}=$ $=2,25$ В, $U_{пр}=50$ В, $I_{спр}=0,05\div 7,5$ мА при $U_{пр}=10$ В, $I_{ср. доп}=75$ мА	1 »
Полупроводниковый диод $D1$ (Д226)	1 »
Тумблеры $П1$ и $П2$ (ТВ-2-1)	2 »

Порядок выполнения работы

1. Снять вольт-амперную характеристику динистора. Для чего, плавно изменяя напряжение блока питания $БП1$ от нуля до максимального значения (30 В) и выбирая необходимые пределы измерения прибора Ц4311, записать в табл. 1 ряд полученных значений тока и напряжения динистора.

2. По данным табл. 1 построить вольт-амперную характеристику динистора. Если количество точек недостаточно для построения характеристики, повторить измерение.

Т а б л и ц а 1. Вольт-амперная характеристика динистора

I_a , мА			
U_a , В			

3. По построенной характеристике определить ток включения динистора $I_{вкл}$, напряжение включения $U_{вкл}$ и остаточное напряжение $U_{ост}$ при токе I_a , соответствующем максимальному выходному напряжению блока питания БП1.

4. Снять пусковую характеристику тиристора, занося результаты измерений в табл. 2. Для чего необходимо замкнуть переключатели П1 и П2, вывести потенциометр R3, установить напряжение питания, равное нулю, и установить ток управления, равный 50 мкА. Плавно изменяя напряжение питания, определить момент, при котором происходит переключение тиристора. Напряжение, показываемое вольтметром V перед моментом переключения, будет соответствовать напряжению включения тиристора для заданного тока управления. Выполнить подобные операции для других значений тока управления, указанных в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Пусковая характеристика тиристора

$I_{упр}$, мкА	50	100	200	500	1000	3000	5000
$U_{вкл}$, В							

5. По данным табл. 2 построить в соответствующем масштабе пусковую характеристику тиристора.

6. Определить остаточное напряжение тиристора при максимально возможном токе для данной схемы. Для чего установить напряжение питания, равное 200 В, плавно изменяя его от нуля. Уровень тока управления при этом произвольный, а переключатель П2 замкнут. Изменением сопротивления потенциометра R3 установить максимально возможный ток в схеме и измерить остаточное напряжение $U_{ост}$ на тиристоре. Очевидно, что при заданных параметрах схемы тиристор должен находиться во включенном состоянии.

7. Определить ток выключения тиристора $I_{\text{выкл}}$. Для чего установить сначала максимальный ток в цепи управления тиристора, а затем увеличить напряжение питания до 200 В. Замкнув переключатель $P2$ (если он был разомкнут), установить потенциометром $R3$ максимальный ток через тиристор. Убедиться по показаниям вольтметра V , что тиристор включен. Разомкнуть переключатель $P2$; а затем переключатель $P1$. Тиристор должен остаться во включенном состоянии. После этого изменением сопротивления потенциометра $R3$ ток через тиристор плавно уменьшать до тех пор, пока не произойдет выключение. Затем при неизменном положении потенциометра $R3$ замкнуть переключатель $P2$. Если при этом тиристор не включится, следует замкнуть и разомкнуть переключатель $P1$, подав тем самым в тиристор импульс включения. После включения тиристора через него будут проходить два тока: один через цепь с миллиамперметром, а другой через резистор $R2$. Так как изменение сопротивления $R3$ было остановлено в момент выключения, а напряжение питания осталось неизменным, ток в цепи миллиамперметра будет током выключения тиристора.

Содержание отчета

1. Наименование отчета.
2. Название и технические данные использованных измерительных приборов.
3. Схемы для исследования характеристик динистора и тиристора.
4. Табл. 1 и 2 с записанными результатами по снятию вольт-амперной характеристики динистора и пусковой характеристики тиристора.
5. Значения и наименования определенных параметров тиристора.
6. Построенные вольт-амперная характеристика динистора и пусковая характеристика тиристора.

Контрольные вопросы

1. Какие переключающие диоды называются динисторами, а какие тиристорами?
2. Какой участок на вольт-амперной характеристике динистора (см. рис. 1) соответствует его включенному состоянию; AB , OA , BB ?
3. На каком участке вольт-амперной характеристики динистор обладает отрицательным дифференциальным сопротивлением: OA , AB , BB ?

4. Что происходит с напряжением включения тиристора при росте тока через управляющий электрод: напряжение падает, растет или остается неизменным?
5. Какой ток называется током спрямления тиристора?
6. Каковы основные параметры тиристора?
7. Что называется пусковой характеристикой тиристора?

Работа № 7. ИССЛЕДОВАНИЕ ТИРАТРОНА

Цель работы — ознакомиться с основными параметрами приборов тлеющего разряда; снять характеристику зажигания тиратрона, используя схему генератора пилообразного напряжения.

Пояснения. Газовый стабилитрон — это двух-электродная лампа с холодным катодом, наполненная инертным газом или смесью газов. Вольт-амперная характеристика стабилитрона показана на рис. 1. Для стабилитрона, используемого в схемах стабилизации напряжения, рабочим является участок AB характеристики, который соответствует области устойчивого тлеющего разряда. На этом участке значительным изменениям тока через стабилитрон соответствуют незначительные изменения напряжения. Так, при изменении тока от $I_{ст.мин}$ до $I_{ст.макс}$ напряжение на стабилитроне изменяется на 1—2%. Это свойство стабилитрона используется для стабилизации напряжения. Стабилитрон характеризуется следующими параметрами:

$U_{ст}$ — средним напряжением стабилизации для данного типа стабилитронов;

$I_{ст.мин}$ и $I_{ст.макс}$ — минимальным и максимальным токами, при которых прибор сохраняет стабилизирующее свойство;

$U_{зж}$ — напряжением зажигания;

$\Delta U_{ст}$ — изменением напряжения стабилизации при изменении тока от $I_{ст.мин}$ до $I_{ст.макс}$.

Эти параметры позволяют выбрать тип стабилитрона и рассчитать схему стабилизации напряжения, расчет и исследование которой производится так же, как схемы

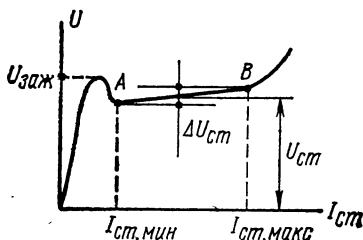


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика стабилитрона

стабилизатора на полупроводниковом стабилитроне (см. работу № 10). При этом следует учитывать, что у газовых стабилитронов напряжение зажигания больше напряжения стабилизации, поэтому минимальное входное напряжение схемы стабилизатора не должно быть меньше $U_{\text{зж}}$.

Тиратроны с холодным катодом могут быть с одной и с двумя сетками. Тиратроны с двумя сетками часто используют в трехэлектродном включении, соединяя обе сетки вместе.

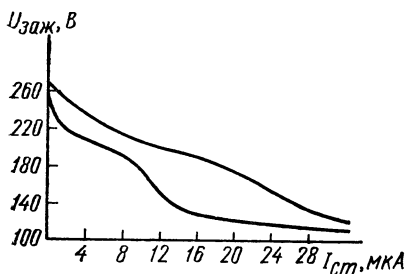


Рис. 2. Зависимость напряжения зажигания тиратрона от тока сеток

Рассмотрим трехэлектродный режим включения тиратрона, имеющего катод, анод и две сетки. При подаче напряжения питания одновременно на анод и сетки в тиратроне возникает сначала вспомогательный разряд

между соединенными сетками и катодом, а затем основной — между анодом и катодом. Напряжение зажигания на аноде $U_{\text{зж}}$ зависит от тока сеток $I_{\text{с}}$ и называется характеристикой зажигания тиратрона. На рис. 2 показана эта зависимость с учетом разброса $U_{\text{зж}}$.

Вольт-амперная характеристика тиратрона, т. е. зависимость анодного напряжения от тока аналогична вольт-амперной характеристике стабилитрона (см. рис. 1) с той разницей, что напряжение $U_{\text{зж}}$ есть функция сеточного тока, причем $U_{\text{зж}}$ может намного превышать напряжение горения $U_{\text{г}}$ (или напряжение стабилизации, что одно и то же).

После возникновения тлеющего разряда в тиратроне сетка теряет свое управляющее действие и погасить тиратрон (так же как и стабилитрон) можно, только уменьшив анодный ток или напряжение. Возможность с помощью сетки управлять напряжением зажигания позволяет использовать тиратрон в качестве ионного реле, а также преобразователя сигналов малой мощности.

Чтобы построить ту или иную схему с применением тиратрона, надо знать его основные параметры и характеристики. Исследуем характеристику зажигания тира-

трона с двумя сетками в трехэлектродном включении, используемого в схеме автогенератора пилообразного напряжения. На рис. 3, а показана эта схема, а на рис. 3, б — временная диаграмма анодного напряжения, поясняющая ее работу. При подаче анодного напряжения E_a от блока питания происходит заряд конденсатора $C1$ через резисторы $R3$ и $R4$ до напряжения, равного напряжению зажигания тиратрона $U_{зж}$. Значение этого напряжения зависит от подготовительного тока сеток. При за-

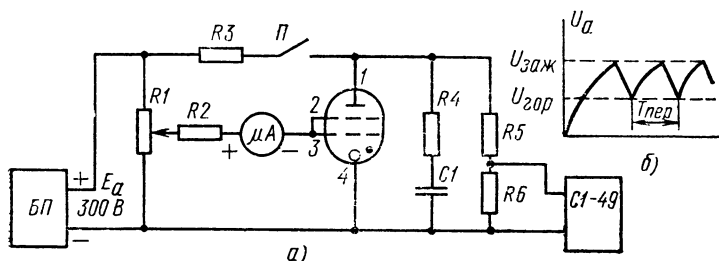


Рис. 3. Схема автогенератора пилообразного напряжения для исследования характеристик тиратрона (а) и временная диаграмма анодного напряжения (б)

жигании тиратрона конденсатор $C1$ начинает быстро разряжаться через резистор $R4$ ($R4 \ll R3$) и тиратрон, обладающий в горящем состоянии малым внутренним сопротивлением. Когда напряжение на конденсаторе $C1$ (падение напряжения на $R4$ мал) станет меньше напряжения горения $U_{г}$, тиратрон погаснет.

Затем начинается повторный цикл заряда и разряда конденсатора. Период повторения импульсов $T_{пер}$ или частота колебаний генератора ($f_{кол} = 1/T_{пер}$) зависит от значений E_a , $U_{зж}$ и $U_{г}$, а также от сопротивления резистора $R3$ и емкости конденсатора $C1$. Очевидно (см. рис. 3, б), чем больше $U_{зж}$, тем дольше заряжается конденсатор, тем больше период повторения импульсов автогенератора. Для нормальной работы схемы необходимо, чтобы ток через тиратрон в конце разряда емкости был меньше тока, при котором возможен нормальный тлеющий разряд. Это достигается соответствующим выбором сопротивления резистора $R3$. Таким образом, по осциллограмме анодного напряжения тиратрона можно определить напряжение зажигания и напряжение горения. Кроме того, измерив напряжение зажигания, а затем от-

ключив анодное напряжение, можно определить сеточный ток, соответствующий измеренному анодному напряжению $U_{\text{зж}}$, и, следовательно, снять и построить характеристику зажигания тиратрона.

Оборудование и аппаратура

Микроамперметр μA постоянного тока с пределом измерения 50 мкА (М220 или прибор Ц4311) . . .	1 шт.
Универсальный источник питания УИП-2 с выходными напряжениями постоянного тока от 20 до 300 В . . .	1 »
Электронный осциллограф С1-49 с измерением амплитуд сигналов от 20 мВ до 120 В	1 »
Тиратрон с холодным катодом ТХ-4Б	1 »
Резисторы: $R3$ (МЛТ-1-2,0 МОм)	1 »
$R4$ (МЛТ-1—20 кОм $\pm 5\%$)	1 »
$R5$ (МЛТ-0,5-10 МОм $\pm 5\%$)	1 »
$R6$ (МЛТ-0,5-100 кОм $\pm 5\%$)	1 »
$R2$ (МЛТ-0,5-1,0 МОм $\pm 5\%$)	1 »
$R1$ (СП-11—А2-100 кОм)	1 »
Конденсатор $C1$ (КСО-5-500-А-2200 пФ)	1 »
Тумблер Π (ТВ-2-1)	1 »

Порядок выполнения работы

1. Подключить источник питания и измерительные приборы к схеме для исследования характеристик тиратрона (см. рис. 3, а). Включить блок питания и после его прогрева установить на выходе напряжение 300 В.

2. Снять характеристику зажигания тиратрона. Для чего разомкнуть контакт переключателя Π и установить по микроамперметру ток сеток, равный нулю, поворачивая движок потенциометра $R1$. Поставить переключатель Π в положение «Генератор вкл.». Измерить напряжение зажигания с помощью осциллографа, учитывая, что делитель на резисторах $R5$ и $R6$ имеет коэффициент деления, равный 100. Записать показания в табл. 1. Измерить напряжение горения тиратрона U_r . Снять на кальку с помощью мягкого карандаша осциллограмму напряжения генератора. Разомкнуть переключатель Π . Установить ток сеток, равный 10 мкА. Подать анодное напряжение на тиратрон, включив переключатель Π . Измерить напряжение зажигания, записав в табл. 1 его значение. Выполнить подобные операции для других значений сеточного тока, указанных в табл. 1.

3. Снять зависимость частоты колебаний автогенератора от напряжения зажигания. Для чего поставить пе-

**Таблица 1. Характеристика зажигания тиратрона
в трехэлектродном включении**

$U_{\text{зж}}, \text{ В}$						
$I_{\text{с}}, \text{ мкА}$	0	10	20	30	40	50

реключатель Π в положение «Генератор вкл.». Изменяя ток в цепи сеток так, чтобы напряжение зажигания уменьшалось от максимального значения примерно одинаковыми интервалами, измерить с помощью осциллографа и записать в табл. 2 период колебаний для каждого устанавливаемого напряжения зажигания. Подсчитать по формуле $f = 1/T_{\text{пер}}$ частоту колебаний генератора для каждого значения $U_{\text{зж}}$ из табл. 2.

**Таблица 2. Зависимость частоты колебаний автогенератора
от напряжения зажигания**

$U_{\text{зж}}, \text{ В}$	240	200	160	120
$T_{\text{пер}}, \text{ мс}$				
$f, \text{ кГц}$				

4. По данным табл. 1 и 2 построить на миллиметровке характеристику зажигания тиратрона и зависимость частоты колебаний автогенератора от напряжения зажигания.

Содержание отчета

1. Наименование отчета.
2. Название и технические данные использованных измерительных приборов.
3. Схема исследования характеристик тиратрона с подключенными для измерения приборами.
4. Осциллограмма напряжения генератора пилообразного напряжения на тиратроне с указанием частоты и напряжения зажигания.
5. Табл. 1 с данными, полученными при снятии характеристики зажигания тиратрона.

6. Табл. 2 с данными, полученными при снятии зависимости частоты колебаний от напряжения зажигания.

7. Построенные характеристики зажигания и зависимости частоты генератора от напряжения зажигания.

Контрольные вопросы

1. Какое свойство стабилитрона используется при построении схем стабилизации напряжения?

2. Как меняется напряжение зажигания тиратрона при увеличении сеточного тока: падает или растет?

3. Что необходимо сделать, чтобы выключить тиратрон: уменьшить анодный ток или сеточный?

4. Каков принцип работы автогенератора пилообразного напряжения?

5. В каком случае частота колебаний генератора больше: когда сеточный ток тиратрона больше или меньше?

6. При какой полярности напряжения сетка — катод в тиратроне будет протекать сеточный ток?

Работа № 8. ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОРЕЗИСТОРА

Цель работы — ознакомиться с основными параметрами и характеристиками приборов с оптическим эффектом; исследовать характеристики фоторезистора.

Пояснения. Зависимость выходного тока фотоэлемента I_{Φ} от светового потока Φ , падающего на его активную поверхность $I_{\Phi}=f(\Phi)$ при условии постоянства напряжения на нем ($U_{\Phi}=\text{const}$), называется световой характеристикой. Целесообразнее и удобнее снимать и задавать световую характеристику в системе координат ток — освещенность. Действительно, пусть на фотоэлемент падает свет. В большинстве случаев при этом известна (или определяется измерительным прибором — люксметром) освещенность E поверхности в люксах. Значит, чтобы определить ток через фотоэлемент по световой характеристике, заданной в координатах ток — световой поток, надо знать значение светового потока в люменах, падающего на активную поверхность фотоэлемента, а также площадь активной поверхности. Если световая характеристика задана в координатах ток — освещенность, ток определяется непосредственно из нее по заданной освещенности, при этом не учитывается активная поверхность.

Другой важной характеристикой фотоэлемента является вольт-амперная. Она отражает зависимость тока в

фотоэлементе от поданного на него напряжения при заданном световом потоке.

Световая и вольт-амперные характеристики вакуумного элемента с сурьмяно-цезиевым катодом показаны на

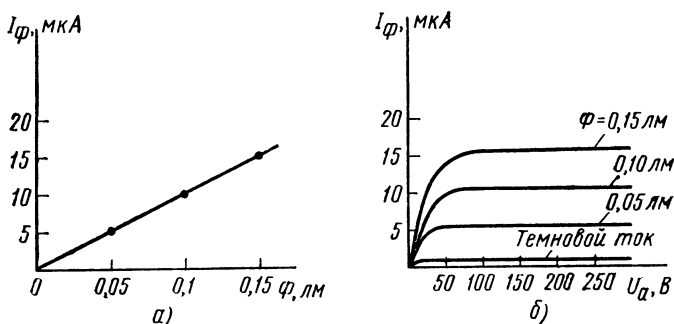


Рис. 1. Характеристики вакуумного фотоэлемента:
а — световая, б — вольт-амперные

рис. 1, а сернисто-висмутового фоторезистора — на рис. 2. Сопоставляя характеристики вакуумного фотоэлемента и фоторезистора, можно заметить их основное отличие: вольт-амперная характеристика вакуумного элемента

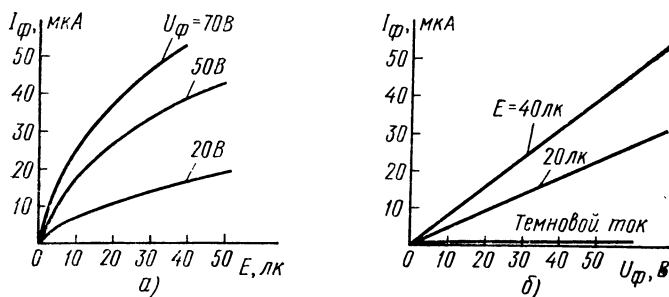


Рис. 2. Характеристики фоторезистора:
а — световые, б — вольт-амперные

имеет явно выраженные участки насыщения, т. е. здесь ток вакуумного фотоэлемента не зависит от напряжения. Эти участки являются рабочими для фотоэлемента. Другими словами, вакуумный фотоэлемент обычно работает в режиме насыщения по напряжению. По световой ха-

рактической характеристике фотоэлемента определяется его основной параметр — интегральная чувствительность

$$K_{\Sigma} = I_{\Phi} / \Phi \text{ мкА/лм.}$$

Для вакуумного фотоэлемента, работающего в режиме насыщения, эта величина не зависит от напряжения. Для полупроводниковых фотоэлементов (фоторезисторов) интегральная чувствительность зависит от подведенного напряжения.

Поэтому для фоторезисторов пользуются понятием удельной чувствительности

$$K_0 = I_{\Phi} / \Phi U_{\Phi} \text{ мкА/лм} \cdot \text{В.}$$

Для оценки свойств фотоэлементов пользуются также понятием спектральной чувствительности, которая характеризует работу фотоэлемента при воздействии светового потока определенной длины волны.

Важным параметром фотоэлемента является темновой ток, который протекает через прибор при отсутствии света. Так как для фоторезистора темновой ток зависит от приложенного напряжения,

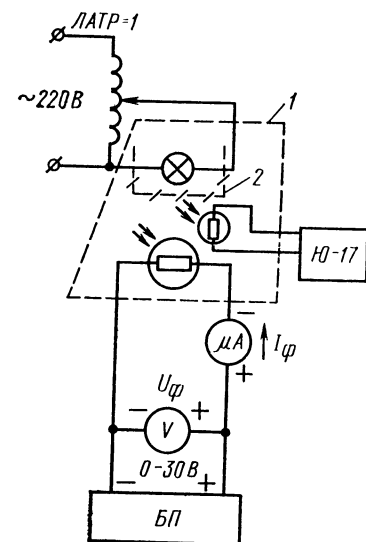


Рис. 3. Схема исследования характеристик фоторезистора

обычно в справочной литературе указывают темновое сопротивление.

Исследование характеристик фотоприборов выполняют на стенде, оборудованном светонепроницаемым кожухом 1 из непроводящего материала — текстолита, дерева (рис. 3). В верхней части кожуха (внутри его) размещен электрический патрон с устройством 2 для рассеивания света и лампочкой, подключенной к автотрансформатору с регулируемым выходным напряжением. Автотрансформатор вмонтирован в стенд, а его рукоятка регулировки напряжения выведена на лицевую панель. На дне кожуха (на горизонтальной поверхности стенда) уста-

новлен исследуемый фоторезистор. Соединительные провода от фоторезистора подключены к клеммам, расположенным на лицевой панели стенда. В стенке кожуха имеется дверца, через которую вносится и выносится измерительный прибор (или его светочувствительная головка) для определения освещенности.

Оборудование и аппаратура

Микроамперметр μA постоянного тока с пределом измерения 50 мкА (М220 или прибор Ц4311) . . .	1 шт.
Вольтметр V постоянного тока с пределом измерения 30 В (М330)	1 »
Источник напряжения постоянного тока с регулируемым выходным напряжением от 0 до 30 В при нагрузке до 10 мА	1 »
Лабораторный автотрансформатор ЛАТР-1	1 »
Люксметр Ю-17 с выносной головкой на пределы измерения до 100 лк	1 »
Электрическая лампочка 220 В, 100 Вт	1 »
Фоторезистор ФС-Б2 ($S_{\text{пов}} = 1,21 \text{ см}^2$, $K_0 = 250 \text{ мкА/лм} \cdot \text{В}$)	1 »

Порядок выполнения работы

1. Подключить стабилизатор напряжения и измерительные приборы к схеме для исследования фоторезистора (см. рис. 3).

2. Рассчитать удельную чувствительность K_0 фоторезистора по паспортной световой характеристике, приведенной на рис. 2, а при $E = 40 \text{ лк}$ и $U_{\text{ф}} = 20 \text{ В}$. По известной площади светочувствительной поверхности (см. данные измерительных приборов) вычислить значение удельной чувствительности фоторезистора через единицу светового потока.

3. Снять семейство световых характеристик фоторезистора. Для чего установить напряжение блока питания, равное 10 В. Изменяя освещенность внутри кожуха одинаковыми интервалами по 10 лк, поворачивая рукоятку автотрансформатора, питающего осветительную лампочку, измерить и записать в табл. 1 значение тока через фоторезистор для каждого заданного значения освещенности. Выполнить указанные операции для других значений напряжения питания фоторезистора, приведенных в табл. 1.

4. Снять семейство вольт-амперных характеристик фоторезистора. Для чего установить наименьшую освещенность в кожухе. Изменяя напряжение блока питания

Т а б л и ц а 1. Световая характеристика фоторезистора

$U_{\phi}=10 \text{ В}$		$U_{\phi}=20 \text{ В}$		$U_{\phi}=30 \text{ В}$	
$E, \text{ лк}$	$I_{\phi}, \text{ мА}$	$E, \text{ лк}$	$I_{\phi}, \text{ мА}$	$E, \text{ лк}$	$I_{\phi}, \text{ мА}$

интервалами по 5 В от 0 до 30 В, записать значения тока через фоторезистор в табл. 2. Выполнить подобные операции для других значений освещенности, указанных в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Вольт-амперная характеристика фоторезистора

$E=0 \text{ лк}$		$E=20 \text{ лк}$		$E=40 \text{ лк}$		$E=60 \text{ лк}$	
$U_{\phi}, \text{ В}$	$I_{\phi}, \text{ мА}$	$U_{\phi}, \text{ В}$	$I_{\phi}, \text{ мА}$	$U_{\phi}, \text{ В}$	$I_{\phi}, \text{ мА}$	$U_{\phi}, \text{ В}$	$I_{\phi}, \text{ мА}$

5. По данным табл. 1 и 2 построить световые и вольт-амперные характеристики фоторезистора и определить по ним темновой ток $I_{\phi 0}$ фоторезистора при напряжении 10 В, а также удельную чувствительность K_0 фоторезистора при освещенности $E=40 \text{ лк}$ и напряжении $U_{\phi}=20 \text{ В}$.

6. Сравнить полученное экспериментально значение удельной чувствительности фоторезистора с расчетным, определенным в п. 2 (они могут отличаться на 20—30 %).

Содержание отчета

1. Наименование отчета.
2. Название и технические данные использованных измерительных приборов.
3. Схема исследования характеристик фоторезистора с подключенными для измерений приборами.
4. Табл. 1 и 2 с данными, полученными при снятии световой и вольт-амперной характеристик фоторезисторов.

5. Построенные световые и вольт-амперные характеристики фоторезистора.

6. Расчетные и экспериментально определенные параметры фоторезистора.

Контрольные вопросы

1. Что такое внутренний фотоэффект?
2. К приборам какого типа относится фоторезистор: с внутренним или с внешним фотоэффектом?
3. Что называется световой характеристикой фотоэлемента?
4. Чем отличаются вольт-амперные характеристики вакуумного фотоэлемента и фоторезистора?
5. В какой системе координат целесообразнее строить световые характеристики фотоэлементов и почему: в координатах ток — световой поток или ток — освещенность?
6. Как определяется чувствительность фоторезистора?

Глава третья ВЫПРЯМИТЕЛИ. СТАБИЛИЗАТОРЫ

Работа № 9. ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНО- И ДВУХПОЛУПЕРИОДНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Цель работы — изучить принцип действия одно- и двухполупериодного выпрямителей и снять их внешние характеристики.

Пояснения. Выпрямитель характеризуется следующими параметрами:

$U_{\text{вх.ном}}$ — номинальным (с заданным значением) входным напряжением переменного тока заданной частоты;

$I_{\text{ном}}$ — номинальным выходным (нагрузочным) постоянным током;

$U_{\text{ном}}$ — номинальным выходным постоянным напряжением на нагрузке, соответствующем $I_{\text{ном}}$;

$U_{\text{х.х}}$ — напряжением холостого хода выпрямителя.

Параметры выпрямителя зависят от схемы выпрямления, которая для однофазного тока может быть одно- или двухполупериодной. В первой используется для работы одна полуволна (один полупериод) входного переменного напряжения, а во второй — обе полуволны.

Выходное напряжение выпрямителя зависит от нагрузочного тока. График зависимости среднего значения выходного напряжения от среднего значения нагрузочного тока называется внешней характеристикой выпрямителя

(рис. 1) и его можно представить линейной зависимостью

$$U_H = U_{x.x} - kI_H,$$

где U_H — выходное напряжение на нагрузке; $U_{x.x}$ — напряжение холостого хода выпрямителя; I_H — ток нагрузки; k — коэффициент, определяющий наклон характеристики.

Как следует из приведенной зависимости, выходное напряжение выпрямителя уменьшается с ростом нагрузочного тока. Это обусловлено тем, что с ростом тока увеличивается падение напряжения на активных сопротивлениях обмоток трансформатора и последовательно включенных элементах сглаживающего фильтра, а также возрастают внутренние падения напряжений на вентилях (диодах). Таким образом, коэффициент k

представляет собой выходное сопротивление выпрямителя, которое можно определить по его внешней характеристике по формуле

$$r_{\text{вых}} = \Delta U_H / \Delta I_H,$$

где ΔU_H — изменение выходного напряжения выпрямителя, соответствующее изменению тока нагрузки на величину ΔI_H .

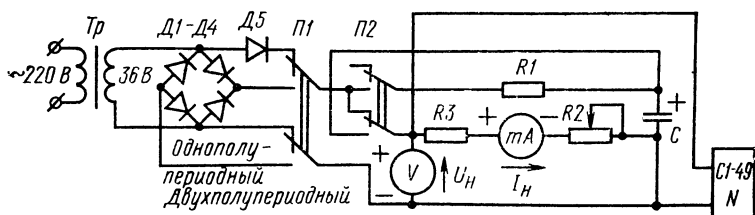


Рис. 2. Схема исследования характеристик выпрямителя

Если выпрямитель снабжен фильтром, естественно, выходное сопротивление увеличивается за счет включения в цепь тока дополнительного активного сопротивления

ния, которым обладает сам фильтр. Пульсации выходного напряжения при наличии фильтра зависят от нагрузочного тока. Причем, чем больше ток нагрузки, тем больше пульсации. Очевидно, что для данного выпрямителя и фильтра можно построить зависимость напряжения пульсации от нагрузочного тока.

Схема исследования характеристик одно- и двухполупериодного выпрямителей показана на рис. 2. Переключателем $П1$ подключается нагрузка $R2$, $R3$ к одно- или к двухполупериодному выпрямителю. Номинальным током в данной схеме считается ток, который протекает в выходной цепи выпрямителя (с фильтром или без него), когда потенциометр $R2$ выведен полностью, т. е. нагрузкой является только резистор $R3$. Переключателем $П2$ осуществляется подключение RC -фильтра ($R1$, C) к выпрямителю либо отключение его.

Оборудование и аппаратура

Электронный осциллограф С1-49	1 шт.
Вольтметр V постоянного тока с пределом измерения 50 В (М330 или прибор Ц4311)	1 »
Миллиамперметр mA постоянного тока с пределом измерения 30 мА (М330 или прибор Ц4311)	1 »
Полупроводниковые диоды $Д1—Д5$ (Д226)	5 »
Резисторы: $R1$ (МЛТ-2-120 Ом $\pm 5\%$)	1 »
$R3$ (МЛТ-2-1,8 кОм $\pm 5\%$)	1 »
$R2$ (СПО-2-43 кОм $\pm 20\%$)	1 »
Конденсатор C (К50-3-50-10 мкФ)	1 »
Галетные переключатели $П1$, $П2$ на два направления и два положения	2 »
Силовой трансформатор Tr (ТБС-50-220/36)	1 »

Порядок выполнения работы

1. Подключить измерительные приборы к схеме исследования характеристик выпрямителей.

2. Снять внешнюю характеристику однополупериодного выпрямителя с фильтром и без него, изменяя ток нагрузки от минимального до максимального значения интервалами в 2 мА и занося результаты измерений в табл. 1. Регулирование нагрузочного тока осуществляется изменением сопротивления резистора $R2$.

3. Снять на кальку осциллограммы выходного напряжения однополупериодного выпрямителя с фильтром и без него при максимальном токе нагрузки. При этом не-

Т а б л и ц а 1. Внешняя характеристика однополупериодного выпрямителя

Параметр	Без фильтра					С фильтром				
U_n , В										
I_n , мА										

обходимо на экране осциллографа установить неподвижное изображение кривой исследуемого напряжения.

4. Снять внешнюю характеристику двухполупериодного выпрямителя с фильтром и без него, изменяя ток нагрузки интервалами в 2 мА и занося результаты измерений в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Внешняя характеристика двухполупериодного выпрямителя

Параметр	С фильтром					Без фильтра				
U_n , В										
I_n , мА										

5. Снять на кальку осциллограммы выходного напряжения двухполупериодного выпрямителя с фильтром и без него при максимальном токе нагрузки.

6. Снять зависимость амплитуды пульсации выходного напряжения от тока нагрузки для обоих выпрямителей с фильтрами, занося показания в табл. 3. Ток нагрузки изменять интервалами в 3 мА. Измеряют амплитуду пульсации с помощью осциллографа, у которого произведена калибровка усиления канала вертикального отклонения. При этом к выпрямителю подключают закрытый вход осциллографа.

7. Построить график внешней характеристики для одно- и двухполупериодных выпрямителей с фильтрами и без них, пользуясь данными табл. 1 и 2.

8. Определить выходное сопротивление выпрямителей обоих типов с фильтром и без него, пользуясь построенными графиками внешних характеристик. Значения сопротивлений записать в табл. 4.

**Таблица 3. Зависимость амплитуды пульсации
выходного напряжения от тока нагрузки**

Параметр	Однополупериодное выпрямление					Двухполупериодное выпрямление				
$U_{\text{пульс}}, \text{ мВ}$										
$I_{\text{н}}, \text{ мА}$										

Таблица 4. Выходное сопротивление выпрямителей

Параметр	Однополупериодное выпрямление		Двухполупериодное выпрямление	
$r_{\text{вых}}, \text{ Ом}$	с фильтром	без фильтра	с фильтром	без фильтра

Содержание отчета

1. Наименование отчета.
2. Название и технические данные использованных измерительных приборов.
3. Схема исследования характеристик выпрямителей с подключенными измерительными приборами.
4. Табл. 1 и 2 с результатами измерений, полученными при снятии внешних характеристик выпрямителей.
5. Табл. 3 с данными по измерению пульсаций.
6. Графики внешних характеристик выпрямителей.
7. Табл. 4 с рассчитанными значениями выходных сопротивлений выпрямителей.
8. Осциллограммы выходных напряжений выпрямителя.

Контрольные вопросы

1. Что происходит с выходным напряжением выпрямителя при росте тока нагрузки: напряжение растет, падает или остается неизменным?
2. В каком случае среднее значение напряжения выпрямителя при изменении тока нагрузки изменяется значительнее: без фильтра; с фильтром?
3. В какой схеме выпрямления при одном и том же среднем токе нагрузки течет больший ток через проводящий диод: в двухполу-

периодной мостовой, в однополупериодной, в двухполупериодной со средней точкой и двумя диодами?

4. Как зависит напряжение пульсаций выпрямителя с фильтром от тока нагрузки: напряжение пульсаций падает, растет, остается неизменным?

Работа № 10. ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СТАБИЛИЗАТОРА НАПЯЖЕНИЯ НА СТАБИЛИТРОНЕ

Цель работы — ознакомиться с принципом действия и основными параметрами полупроводниковых стабилизаторов и параметрических стабилизаторов напряжения.

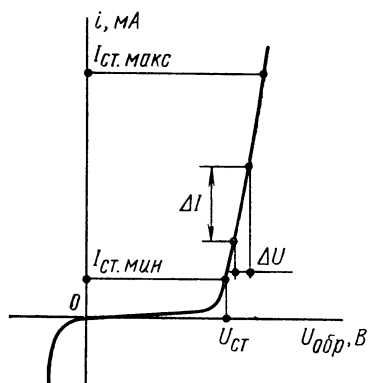


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика стабилитрона (обратная ветвь)

Пояснения. Полупроводниковые стабилитроны составляют особую группу кремниевых диодов, в которых используется для работы участок вольт-амперной характеристики, соответствующий области пробоя p - n -перехода (рис. 1). В этой области незначительному увеличению или уменьшению обратного напряжения соответствует существенное увеличение или уменьшение тока, протекающего через

переход, т. е. при значительном изменении тока через стабилитрон напряжение на нем изменяется незначительно. Это свойство стабилитрона широко используется в схемах стабилизации напряжения. Стабилитроны характеризуются следующими параметрами:

$U_{ст}$ — напряжением стабилизации, по которому производится выбор его типа для схемы с заданным напряжением;

$I_{ст. макс}$ — максимальным током стабилизации, который определяется допустимой мощностью рассеивания и может быть вычислен по формуле $I_{ст. макс} = P_{ст. макс} / U_{ст}$, где $P_{ст. макс}$ — максимальная мощность рассеивания стабилитрона при заданной температуре окружающей среды;

$I_{\text{ст.мин}}$ — минимальным током стабилизации, т. е. таким значением тока через стабилитрон, при котором возникает устойчивый пробой;

$r_{\text{д}}$ — динамическим сопротивлением, определяемым по формуле $r_{\text{д}} = \Delta U_{\text{ст}} / \Delta I_{\text{ст}}$, где $\Delta U_{\text{ст}}$ — величина изменения напряжения стабилизации при изменении тока от первоначального значения на величину $\Delta I_{\text{ст}}$.

Наиболее часто стабилитроны используют в схемах стабилизации напряжения. В настоящее время широкое распространение получили полупроводниковые стабилизаторы напряжения питания, т. е. устройства, выходные напряжения которых практически не изменяются как при изменении напряжения питания, так и при изменении тока нагрузки. По сравнению со стабилизаторами на электронных лампах и газоразрядных приборах полупроводниковые стабилизаторы отличаются высокой надежностью, экономичностью, меньшими массой и габаритами.

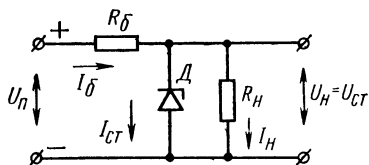


Рис. 2. Схема простейшего стабилизатора напряжения

Распространенная схема простейшего параметрического стабилизатора постоянного напряжения, показанная на рис. 2, представляет собой делитель напряжения, состоящий из балластного резистора R_6 и стабилитрона D , к которому подключено сопротивление нагрузки R_H . При изменении питающего напряжения U_H изменяется ток через резистор R_6 . Это изменение тока вызвало бы изменение напряжения на нагрузочном резисторе, пропорциональное его сопротивлению, если бы не было стабилитрона. Подключение стабилитрона параллельно нагрузке препятствует изменению напряжения, поддерживая его на уровне $U_{\text{ст}}$. При этом изменению тока через резистор R_6 соответствует примерно такое же изменение тока через стабилитрон, а ток в нагрузке изменяется незначительно. В этом заключается стабилизирующее свойство схемы данного стабилизатора. Итак, на резисторе R_6 падает разность напряжений U_H и стабилизируемого напряжения $U_H = U_{\text{ст}}$. Этому соответствует равенство

$$R_6 I_6 = U_H - U_{\text{ст}}, \quad (1)$$

причем

$$I_6 = I_{ст} + I_n, \quad (2)$$

где I_6 , $I_{ст}$, I_n — токи в ветвях схемы, показанной на рис. 2.

Допустим, что напряжение U_n изменяется от минимального значения $U_{н.мин}$ до максимального $U_{н.макс}$. Тогда, чтобы схема сохраняла стабилизирующее свойство, ток $I_{ст}$ через стабилитрон должен быть больше $I_{ст.мин}$ при $U_n = U_{н.мин}$ и быть меньше $I_{ст.макс}$ при $U_n = U_{н.макс}$.

С другой стороны, при изменении сопротивления нагрузки R_n от номинального (заданного значения) ток через стабилитрон также изменяется, причем с уменьшением R_n (с увеличением тока нагрузки) ток через стабилитрон уменьшается и наоборот. Чтобы и в этом случае схема сохраняла стабилизирующее свойство, ток через стабилитрон $I_{ст}$ должен быть больше $I_{ст.мин}$ при $R_n = R_{н.мин}$ и ток $I_{ст}$ должен быть меньше $I_{ст.макс}$ при $R_n = R_{н.макс}$. Обеспечение условия стабилизации можно записать математически, учитывая выражения (1) и (2), в следующем виде:

$$\begin{aligned} R_{б.макс} &\leq \frac{U_{н.мин} - U_{ст}}{I_{ст.мин} + I_{н.макс}}; \\ R_{б.мин} &\geq \frac{U_{н.макс} - U_{ст}}{I_{ст.макс} + I_{н.мин}}, \end{aligned} \quad (3)$$

где ток нагрузки $I_n = U_{ст}/R_n$. Из этих неравенств следует, что сопротивление балластного резистора R_6 должно быть меньше $R_{б.макс}$ и больше $R_{б.мин}$.

Стабилизатор помимо основных параметров — номинальных выходного напряжения и тока нагрузки характеризуется еще и другими параметрами, из которых мы рассмотрим лишь коэффициент стабилизации напряжения, обозначив его $K_{ст}$. Этот коэффициент показывает, во сколько раз относительное изменение выходного напряжения стабилизатора меньше относительного изменения входного напряжения при постоянном нагрузочном сопротивлении и определяется по формуле

$$K_{ст} = \frac{\Delta U_n / U_n}{\Delta U_{н} / U_{н}} \text{ при } R_n = \text{const}, \quad (4)$$

где ΔU_n — приращение входного напряжения стабилизатора; $\Delta U_{н}$ — приращение напряжения на выходе.

Коэффициент стабилизации $K_{ст}$, определенный по формуле (4), связан с параметрами схемы следующим образом:

$$K_{ст} = U_{ст} R_c / U_{п} r_d. \quad (5)$$

Схема для исследования параметрического стабилизатора показана на рис. 3. Переключателем Π осуществляется подключение нагрузочных резисторов $R2$ или $R3$ с разными сопротивлениями, тем самым изменяется нагрузочный ток.

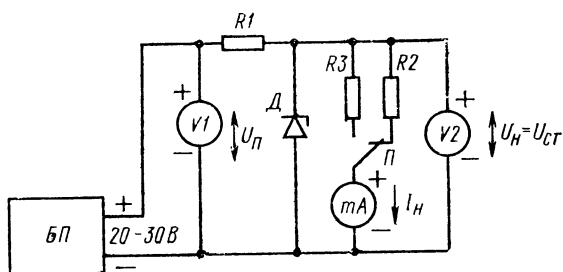


Рис. 3. Схема исследования параметрического стабилизатора

Оборудование и аппаратура

Стабилизатор напряжения постоянного тока с регулируемой выходной напряжением от 20 до 30 В при токе до 100 мА (Б5—7)	1 шт.
Вольтметр V2 постоянного тока класса 0,1 с пределом измерения 15 В (Д591 или прибор Р386) . .	1 »
Миллиамперметр mA постоянного тока с пределом измерения 15 мА	1 »
Вольтметр V1 постоянного тока с пределом измерения 30 В (М330 или прибор Ц4311)	1 »
Полупроводниковый стабилитрон Д (Д808)	1 »
Резисторы: R1 (МЛТ-1-1,0 кОм ± 5%)	1 »
R2 (МЛТ-0,5-1,6 кОм ± 5%)	1 »
R3 (МЛТ-0,5-820 Ом ± 5%)	1 »

Порядок выполнения работы

1. Подключить к схеме для исследования параметрического стабилизатора измерительную аппаратуру и источник питания. Подготовить приборы для измерения соответствующих параметров.

Т а б л и ц а. Определение коэффициента стабилизации

$R_H = 1,6 \text{ кОм}$		$R_H = 820 \text{ Ом}$	
$U_{п}, \text{ В}$	$U_{н}, \text{ В}$	$U_{п}, \text{ В}$	$U_{н}, \text{ В}$
25 30		25 30	
$K_{ст} = . . .$		$K_{ст} = . . .$	

2. Рассчитать по известным параметрам схемы коэффициент стабилизации напряжения $k_{ст}$ стабилизатора, считая $U_{ст} = 8 \text{ В}$, $U_{п} = 25 \text{ В}$, $r_d = 10 \text{ Ом}$.

3. Определить экспериментально и записать в таблицу коэффициент стабилизации напряжения при изменении входного напряжения от 25 до 30 В для обоих нагрузочных резисторов. Для чего установить входное напряжение, равное 25 В, и измерить выходное напряжение стабилизатора с точностью до пяти сотых долей вольта. Затем, увеличив входное напряжение до 30 В, снова измерить выходное напряжение. По результатам измерений, записанным в таблицу, и формуле (4) определить искомый коэффициент стабилизации. Сравнить полученные значения коэффициента стабилизации с расчетными в п. 2, учитывая, что они могут отличаться на 20—30%.

4. Определить расчетно-экспериментальным путем минимальное $R_{б.мин}$ и максимальное $R_{б.макс}$ сопротивления балластного резистора при $U_{п.мин} = 25 \text{ В}$, $U_{п.макс} = 30 \text{ В}$. Для определения сопротивлений балластного резистора по формулам (3) необходимо измерить минимальный $I_{н.мин}$ и максимальный $I_{н.макс}$ нагрузочные токи, определенные при любом входном напряжении от 25 до 30 В. В качестве напряжения $U_{ст}$ принять значение напряжения $U_{н}$ из таблицы, округляя его до десятых долей вольта. Для стабилизатора Д808 считать, что $I_{ст.мин} = 3 \text{ мА}$, $I_{ст.макс} = 30 \text{ мА}$ (паспортные данные).

5. По рассчитанному диапазону сопротивления убедиться в правильности выбора номинала резистора R_I в схеме исследуемого стабилизатора.

Содержание отчета

1. Наименование отчета.
2. Название и технические данные использованных измерительных приборов.
3. Схема параметрического стабилизатора с подключенными измерительными приборами.
4. Таблица с результатами измерений и вычислений коэффициента стабилизации.
5. Наименования и значения расчетных и экспериментально определенных параметров стабилизатора.

Контрольные вопросы

1. Что называется динамическим сопротивлением стабилитрона?
2. Как зависит коэффициент стабилизации параметрического стабилизатора от динамического сопротивления стабилитрона: коэффициент стабилизации выше, когда динамическое сопротивление больше или меньше?
3. В каком случае ток через стабилитрон в параметрическом стабилизаторе больше: когда нагрузочное сопротивление больше или меньше?
4. Какими достоинствами обладают полупроводниковые стабилизаторы по сравнению со стабилизаторами на электронных лампах и газоразрядных приборах?
5. Каков принцип действия параметрического стабилизатора напряжения на полупроводниковом стабилитроне?

Работа № 11. ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЕНСАЦИОННОГО СТАБИЛИЗАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

Цель работы — изучить принцип действия компенсационного стабилизатора напряжения последовательного типа на транзисторах и стабилитроне; ознакомиться с основными параметрами, характеризующими стабилизаторы.

Пояснения. Стабилизаторы напряжения компенсационного типа получили свое название в соответствии с принципом действия, согласно которому выходное напряжение стабилизатора сравнивается с эталонным и возникающая при этом разница напряжений стремится изменить сопротивление регулирующего элемента таким образом, чтобы это изменение сопротивления приводило к компенсации (устранению) указанной разницы.

Структурная схема компенсационного стабилизатора напряжения последовательного типа показана на рис. 1. Входное напряжение $U_{вх}$ поступает на регулирующий

элемент 1, в качестве которого обычно используют электронную лампу или транзистор, работающие в активном (усилительном) режиме. Регулирующий элемент включен последовательно с нагрузкой (отсюда и название типа стабилизатора последовательный). Для измерения выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ стабилизатора служит измерительный элемент ИТ, состоящий из делителя на резисторах $R1$, $R2$ и источника 2 опорного напряжения $U_{\text{оп}}$. Коэффициент деления $\gamma = R2/(R1 + R2)$ зависит от требуе-

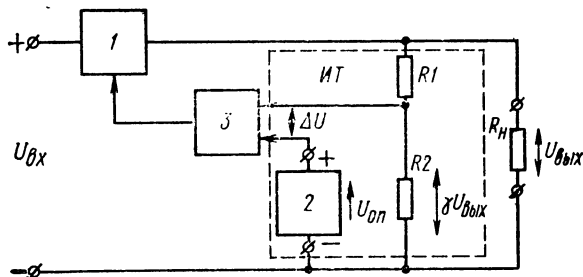


Рис. 1. Компенсационный стабилизатор напряжения последовательного типа

мого соотношения между выходным напряжением опорного элемента. Так, если $U_{\text{оп}} = 8$ В, а требуемое значение выходного напряжения $U_{\text{вых}} = 40$ В, коэффициент деления γ должен быть равен $1/5$. Если задано выходное напряжение $U_{\text{вых1}}$ и напряжение $U_{\text{оп1}}$, коэффициент $\gamma = U_{\text{оп1}}/U_{\text{вых1}}$. Таким образом, разность напряжений $\Delta U = \gamma U_{\text{вых1}} - U_{\text{оп1}} = 0$. Если выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ отличается от $U_{\text{вых1}}$, появляется разность напряжения $\Delta U = \gamma U_{\text{вых}} - U_{\text{оп1}}$, поступающая на вход усилителя напряжения постоянного тока 3 (УПТ), выходной сигнал которого пропорционален напряжению ΔU .

Схема строится таким образом, чтобы отрицательному приращению ΔU (что соответствует уменьшению выходного напряжения от значения $U_{\text{вых1}}$) соответствовало уменьшение сопротивления регулирующего элемента и, как следствие, увеличение выходного напряжения почти до значения $U_{\text{вых1}}$. Положительному приращению ΔU будет соответствовать увеличение сопротивления регулирующего элемента и уменьшение выходного напряжения до значения $U_{\text{вых1}}$. Таким образом, стабилизатор пред-

назначен для поддержания выходного напряжения на уровне $U_{\text{вых}}$ как при изменении входного напряжения, так и при изменении тока (или сопротивления) нагрузки, ибо эти изменения в основном и отражаются на выходном напряжении.

Преимущества стабилизаторов компенсационного типа по сравнению с параметрическим заключаются в значительном расширении диапазонов выходных напряжения и тока, лучшей стабилизации, а также более высоком коэффициенте полезного действия (примерно 0,8—0,9). В компенсационных стабилизаторах, как и в параметрических, качество стабилизации при изменении входного напряжения оценивается коэффициентом стабилизации, определяемым при постоянной нагрузке,

$$K_{\text{ст}} = \frac{\Delta U_{\text{вх}}/U_{\text{вх}}}{\Delta U_{\text{вых}}/U_{\text{вых}}} \text{ при } R_{\text{н}} = \text{const}, \quad (1)$$

который показывает, во сколько раз относительное изменение выходного напряжения меньше относительного изменения входного.

Изменение выходного напряжения стабилизатора происходит не только при изменении входного, но и при изменении тока нагрузки. Величина, связывающая изменения выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ стабилизатора с изменениями тока нагрузки $\Delta I_{\text{н}}$, называется выходным сопротивлением и определяется при постоянном входном напряжении

$$r_{\text{вых}} = \Delta U_{\text{вых}}/\Delta I_{\text{н}} \text{ при } U_{\text{вх}} = \text{const}. \quad (2)$$

К. п. д. стабилизатора определяется, как отношение мощности в нагрузке к входной мощности:

$$\eta = U_{\text{вых}} I_{\text{н}} / U_{\text{вх}} I_{\text{вх}}, \quad (3)$$

где $I_{\text{н}}$ — максимальное значение тока нагрузки.

Схема стабилизатора напряжения, предназначенного для исследования, показана на рис. 2, где регулирующим элементом служит транзистор $T1$, а источником опорного напряжения — стабилитрон D , режим которого задается током через балластный резистор $R2$. Резисторы $R3$ и $R4$ образуют делитель выходного напряжения. На транзисторе $T2$ и резисторе $R1$ собран однокаскадный усилитель постоянного тока. Сравнение выходного напряжения делителя и опорного напряжения происходит на переходе

база — эмиттер транзистора $T2$. Подключение нагрузочных резисторов $R5$ и $R6$ осуществляется переключателем Π .

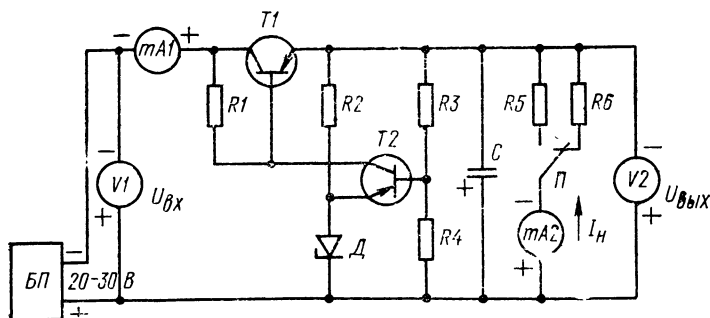


Рис. 2. Схема исследования компенсационного стабилизатора напряжения

Оборудование и аппаратура

Вольтметр $V2$ постоянного тока класса 0,1 с пределом измерения 15 В (Д591 или прибор Р386)	1 шт.
Вольтметр $V1$ постоянного тока с пределом измерения 30 В (М330 или прибор Ц4311)	1 »
Миллиамперметр $mA1$ постоянного тока с пределом измерения 30 мА (М330 или прибор Ц4311)	1 »
Миллиамперметр $mA2$ постоянного тока с пределом измерения 15 мА (М330 или прибор Ц4311)	1 »
Стабилизатор напряжения постоянного тока с регулировкой выходного напряжения от 20 до 30 В при токе до 100 мА (Б5-7)	1 »
Транзисторы: $T1$ (1Т403Б)	1 »
$T2$ (КТ326Б)	1 »
Резисторы: $R1$ (МЛТ-0,5-5-2 кОм $\pm 5\%$)	1 »
$R2$ (МЛТ-0,5-220 Ом $\pm 5\%$)	1 »
$R3$ (МЛТ-0,5-510 Ом $\pm 5\%$)	1 »
$R4$ (МЛТ-0,5-3,0 кОм $\pm 5\%$)	1 »
$R5$ (МЛТ-0,5-3,0 кОм $\pm 5\%$)	1 »
$R6$ (МЛТ-2-820 Ом $\pm 5\%$)	1 »
Полупроводниковый стабилитрон D (Д808)	1 »
Конденсатор К50-6-50-50 мкФ	1 »
Тумблер Π (ТВ-2-1)	1 »

Порядок выполнения работы

1. Подключить к схеме исследования компенсационного стабилизатора источник питания и измерительные приборы.

2. Измерить согласно схеме, показанной на рис. 2, напряжения и токи стабилизатора при условиях, указанных в таблице и обоих нагрузочных сопротивлениях R_5 и R_6 , подключаемых переключателем Π . Результаты измерений занести в таблицу. Выходное напряжение измеряют с точностью до пяти сотых долей вольта.

Т а б л и ц а. Напряжения и токи стабилизатора

$U_{вх}$, В	$U_{вых}$, В	I_H , мА	$I_{вх}$, мА
25		$I_{H.мин} = . . .$	
25		$I_{H.макс} = . . .$	
30		$I_{H.мин} = . . .$	
30		$I_{H.макс} = . . .$	

3. Определить коэффициенты стабилизации $K_{ст}$ напряжения стабилизатора для входного напряжения 25 В при обоих нагрузочных токах $I_{H.мин}$, $I_{H.макс}$; для расчета использовать данные таблицы.

4. Определить выходное сопротивление $r_{вых}$ стабилизатора для входного напряжения 25 и 30 В, пользуясь данными таблицы.

5. Рассчитать к. п. д. стабилизатора для каждой серии измерений, результаты которых отражены в таблице.

Содержание отчета

1. Наименование отчета.
2. Название и технические данные использованных измерительных приборов.
3. Схема исследуемого стабилизатора с подключенными приборами.
4. Таблица с результатами измерений токов и напряжений стабилизатора.
5. Расчетные и экспериментально определенные значения параметров стабилизатора: $r_{вых}$, $K_{ст}$, η .

Контрольные вопросы

1. Каковы преимущества стабилизаторов компенсационного типа по сравнению с параметрическими?
2. Каков принцип действия компенсационного стабилизатора?

3. Какой параметр определяет изменения выходного напряжения с изменением тока нагрузки стабилизатора: коэффициент стабилизации или выходное сопротивление?

4. Как определяют коэффициент полезного действия стабилизатора?

5. Что характеризует коэффициент стабилизации?

Работа № 12. ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛИЗАТОРА ТОКА НА ТРАНЗИСТОРЕ

Цель работы — ознакомиться с назначением и основными параметрами стабилизатора тока на транзисторе; изучить принцип действия параметрического стабилизатора тока и исследовать его характеристики.

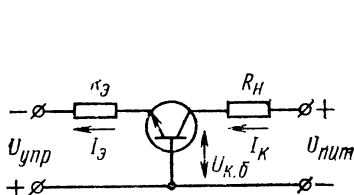


Рис. 1. Включение транзистора по схеме с общей базой

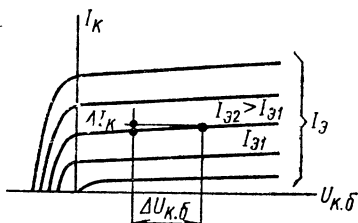


Рис. 2. Выходные характеристики транзистора, включенного по схеме с общей базой

Пояснения. Для некоторых схем, применяющихся в радиоэлектронике, требуются наряду с устройствами стабилизации напряжения устройства для стабилизации тока. Выходной ток таких устройств практически не зависит от сопротивления нагрузки и питающего напряжения. Стабилизаторы тока, как и стабилизаторы напряжения, могут быть компенсационными (устройства с обратной связью) и параметрическими.

Рассмотрим управляемые стабилизаторы тока параметрического типа на транзисторе, включенном, как правило, по схеме с общей базой ОБ (рис. 1). На вольт-амперных выходных характеристиках транзистора, включенного по схеме с ОБ (рис. 2) видно, что при заданном токе эмиттера относительное изменение тока коллектора много меньше соответствующего относительного изменения напряжения коллектор — база. Отношение приращения напряжения коллектор — база $\Delta U_{к.б}$ к соответствующему приращению коллекторного тока ΔI_K при постоянном токе эмиттера $I_э$ определяет динамическое

сопротивление перехода коллектор — база, которое называется коллекторным сопротивлением транзистора,

$$r_k = \Delta U_{к.б} / \Delta I_k \text{ при } I_э = \text{const.}$$

Чем больше коллекторное сопротивление, тем более полого расположено семейство выходных характеристик транзистора, т. е. тем меньше изменяется ток коллектора при изменении напряжения коллектор — база и качественнее стабилизация тока.

Если в коллекторную цепь транзистора включено нагрузочное сопротивление R_n (см. рис. 1), как известно из теоретического курса, коллекторный ток транзистора, т. е. ток через сопротивление нагрузки, будет определяться соотношением

$$I_k = \alpha I_э + U_{к.б} / r_k + I_{к0}, \quad (1)$$

где α — коэффициент передачи эмиттерного тока; $I_э$ — эмиттерный ток транзистора, задаваемый источником управления $U_{упр}$ через резистор $R_э$; $U_{к.б}$ — напряжение коллектор — база; $I_{к0}$ — обратный ток транзистора.

В свою очередь, как следует из рис. 1, $U_{к.б} = U_{пит} - I_k R_n$. Подставляя это значение коллекторного напряжения в соотношение (1), получим

$$I_k = \alpha I_э + \frac{U_{пит} - I_k R_n}{r_k} + I_{к0}. \quad (2)$$

Таким образом, для идеального параметрического стабилизатора тока, т. е. чтобы ток I_k не зависел от $U_{пит}$ и R_n , необходимо бесконечно большое сопротивление r_k . Однако это сопротивление имеет конечное значение. Так, для маломощных транзисторов r_k (в зависимости от эмиттерного тока и типа транзистора) лежит в пределах от 200 кОм до 2 МОм. Отсюда следует, что для лучшей стабилизации желательно выбирать тип транзистора с большим r_k . При известном сопротивлении r_k по соотношению (2) легко определить, во сколько раз изменится ток коллектора при изменении напряжения питания или сопротивления нагрузки.

Количественно эффект стабилизации тока можно оценить с помощью коэффициента

$$K_I = \frac{\Delta U_{к.б} / U_{к.б}}{\Delta I_k / I_k} \text{ при } I_э = \text{const}, \quad (3)$$

который называется коэффициентом стабилизации тока и показывает, во сколько раз относительное изменение

тока коллектора меньше относительного изменения напряжения коллектор — база. Коэффициент стабилизации тока связан с параметрами и режимом транзистора следующим соотношением:

$$K_I = r_K I_K / U_{K.6}. \quad (4)$$

Следует отметить, что коллекторное сопротивление r_K транзистора зависит как от коллекторного тока, так и от напряжения коллектор — база. Однако зависимость r_K от $U_{K.6}$ в рабочих режимах невелика и ею можно пренебречь, а зависимость r_K от I_K выражается соотношением

$$r_K I_K = E_{ЭКВ},$$

где $E_{ЭКВ}$ — постоянный для данного транзистора коэффициент, имеющий размерность вольты. Другими словами, произведение $r_K I_K$ постоянно. Каждому типу транзисторов соответствует средняя величина $E_{ЭКВ}$, называемая эквивалентной э. д. с.

Таким образом, чтобы расчетным путем оценить по соотношению (4) коэффициент стабилизации тока транзистора, надо знать среднюю величину произведения $r_K I_K$ или иметь количественную зависимость r_K от тока I_K .

Оборудование и аппаратура

Миллиамперметр постоянного тока с пределом измерения 10 мА (Д573 или прибор Р386)	1 шт.
Вольтметр постоянного тока с пределом измерения 30 В (М330 или прибор Ц4311)	1 »
Миллиамперметры $mA1$ и $mA2$ постоянного тока с пределами измерения 10 мА (М330 или прибор Ц4311)	2 »
Стабилизатор напряжения постоянного тока с регулировкой выходного напряжения от 0 до 30 В при токе до 100 мА (Б5-7)	2 »
Транзистор КТ602Б	1 »
Резисторы: $R1$ (МЛТ-1-2,7 кОм $\pm 5\%$)	1 »
$R2$ (МЛТ-0,5-1,2 кОм $\pm 5\%$)	1 »
$R3$ (МЛТ-0,5-2,5 кОм $\pm 5\%$)	1 »
Полупроводниковые диоды $D1$ и $D2$ (Д226)	2 »
Галетный переключатель P на три положения одно направление	1 »

Порядок выполнения работы

1. Подключить измерительную аппаратуру и стабилизаторы напряжения к схеме исследования стабилиза-

тора тока (рис. 3). Диоды $D1$ и $D2$ включены для предохранения транзистора при неправильном включении схемы.

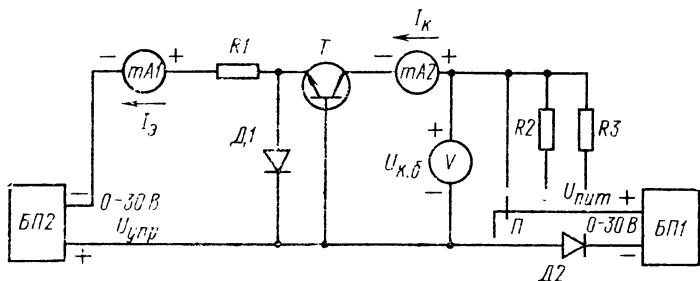


Рис. 3. Схема исследования стабилизатора тока

2. Определить экспериментально коэффициент стабилизации тока исследуемой схемы при напряжении $U_{к.б} = 20$ В и токах эмиттера, указанных в табл. 1. Для определения коэффициента стабилизации тока поставить переключатель Π в положение « $R_{н} = 0$ » и установить напряжение $U_{к.б} = 20$ В. Установить требуемый ток в эмиттерной цепи согласно табл. 1 и измерить ток коллектора с точностью до 3—5 мкА, записав его значение в эту же таблицу. Затем, установив напряжение $U_{к.б} = 10$ В, снова измерить ток коллектора и записать его значение в табл. 1. Высчитав приращения коллекторного тока при изменении напряжения $U_{к.б}$ от 20 до 10 В, определить соответствующие коэффициенты стабилизации, пользуясь формулой (3). Выполнить подобные операции для других значений эмиттерных токов, указанных в табл. 1.

Таблица 1. Коэффициенты стабилизации тока

$U_{к.б}, \text{ В}$	$I_3 = 10 \text{ мА}$	$I_3 = 6 \text{ мА}$	$I_3 = 4 \text{ мА}$	$I_3 = 2 \text{ мА}$
20 | $I_{к}, \text{ мА}$				
10 | $I_{к}, \text{ мА}$				
$\Delta U_{к.б} = 5 \text{ В}$	$\Delta I_{к} = \dots$	$\Delta I_{к} = \dots$	$\Delta I_{к} = \dots$	$\Delta I_{к} = \dots$
$K_I = \dots$				

3. Определить расчетным путем экспериментальное значение коллекторного сопротивления для исследуемого транзистора при токах эмиттера, указанных в табл. 1, и соответствующих токах коллектора. Значения сопротивления записать в табл. 2. Для расчета сопротивления r_K использовать данные табл. 1. Значение тока I_K в табл. 2 при заданном токе I_E соответствует округленному до единиц миллиампер значению тока I_K из табл. 1.

Т а б л и ц а 2. Коллекторные сопротивления транзистора КТ602Б

I_E , мА	10	6	4	2
I_K , мА				
r_K , МОм				
$E_{экв} = r_K I_K$, В				

4. Рассчитать эквивалентную э. д. с. $E_{экв}$ для разных значений эмиттерных токов, пользуясь данными табл. 2 и занося в нее значения $E_{экв}$.

5. По данным табл. 2 построить зависимость сопротивления r_K от тока I_K .

6. Установить ток эмиттера 5 мА и напряжение $U_{к.б} = 20$ В. Включая разные нагрузочные сопротивления в коллекторную цепь стабилизатора тока, убедиться по показаниям прибора в том, что коллекторный ток изменяется незначительно.

Содержание отчета

1. Наименование отчета.
2. Название и технические данные использованных измерительных приборов.
3. Табл. 1 и 2 с результатами измерений и вычислений значений тока, коэффициента стабилизации, коллекторного сопротивления и эквивалентной э. д. с.
4. График зависимости коллекторного сопротивления от тока коллектора.

Контрольные вопросы

1. Как изменяется коллекторный ток транзистора, включенного по схеме с общей базой, если ток эмиттера постоянный, а нагрузочное сопротивление в коллекторной цепи увеличивается?

2. Что называется коллекторным сопротивлением транзистора: отношение приращения коллекторного напряжения к приращению тока коллектора или отношение коллекторного напряжения к коллекторному току?

3. Когда можно получить больший коэффициент стабилизации тока: для транзистора с большим или меньшим коллекторным сопротивлением?

4. Как изменяется коллекторное сопротивление транзистора от тока?

Глава четвертая УСИЛИТЕЛИ

Работа № 13. ИССЛЕДОВАНИЕ ОДИНОЧНЫХ УСИЛИТЕЛЬНЫХ КАСКАДОВ НА ТРАНЗИСТОРАХ

Цель работы — ознакомить учащихся с основными типами усилительных каскадов, принципами их действия и параметрами.

Пояснения. Процесс усиления заключается в получении сигнала, обладающего большей мощностью, чем входной (исходный) сигнал, но с сохранением его характера изменения во времени.

Основные параметры усилительного каскада:

коэффициент усиления по напряжению $K_U = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$;

коэффициент усиления по мощности $K_P = P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}}$;

коэффициент усиления по току $K_I = I_{\text{вых}}/I_{\text{вх}}$;

номинальная выходная мощность — наибольшая мощность, которую усилитель передает нагрузке без заметных искажений сигнала.

Кроме того, усилительные каскады характеризуются входным и выходным сопротивлением, чувствительностью, полосой пропускания, к. п. д., а также коэффициентами вносимых искажений: частотных, фазовых, нелинейных.

Усилительные каскады отличаются по способу включения усилительного элемента (в данной лабораторной работе — транзистора). В зависимости от того, какой из электродов транзистора является общей точкой по переменной составляющей для входной и выходной цепей, различают три вида каскадов: с общим эмиттером (ОЭ),

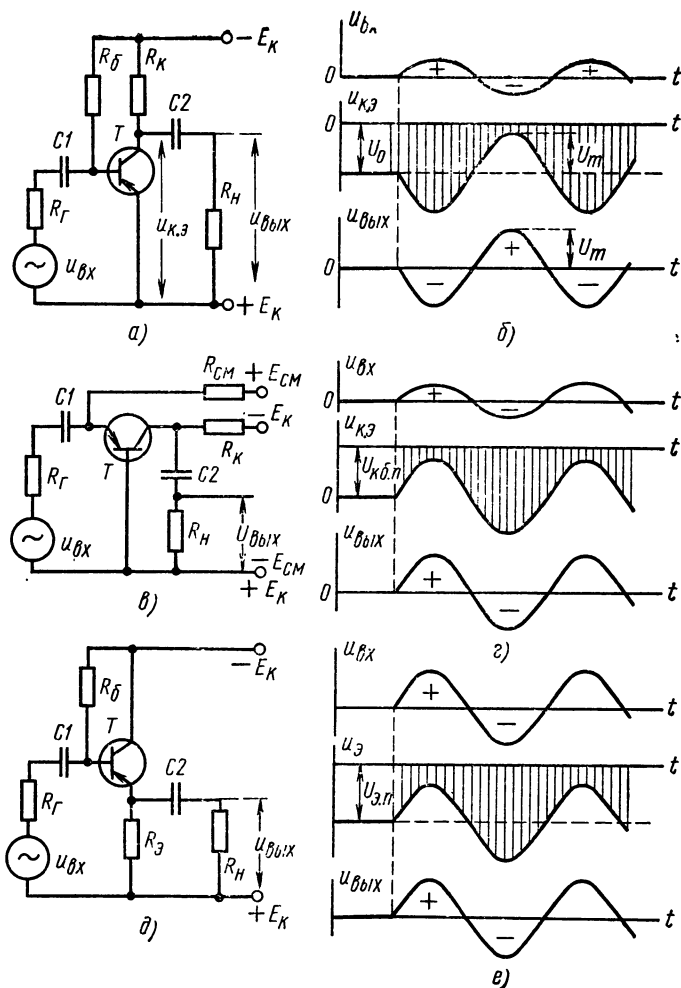


Рис. 1. Схемы каскадов и временные диаграммы их работы при включении с общим эмиттером (а и б), базой (в и е), коллектором (д и е)

с общим коллектором (ОК) и с общей базой (ОБ). Каскад с общим коллектором называется эмиттерным повторителем.

Каскад с общим эмиттером показан на рис. 1, а. Источник усиливаемого входного переменного на-

пряжения $u_{вх}$ с внутренним сопротивлением r_r подключен через конденсатор $C1$ ко входной цепи, т. е. к базе транзистора T . Конденсатор $C1$ служит для разделения по постоянному току цепи источника усиливаемого сигнала и входной цепи транзистора. Питание коллекторной и базовой цепей осуществляется от источника E_k , присоединенного отрицательным полюсом к резисторам R_k и R_b , с помощью которых задается режим транзистора по постоянному току. Конденсатор $C2$ служит для разделения по постоянному току коллекторной цепи транзистора и цепи нагрузки R_n .

Рассмотрим принцип действия каскада с ОЭ, воспользовавшись диаграммами напряжений (рис. 1, б), поясняющими его работу. При отсутствии входного сигнала в базе транзистора протекает постоянный ток покоя $I_{б.п}$ от источника E_k через резистор R_b . Напряжение база — эмиттер мало (для германиевых транзисторов от 0,1 до 0,3 В, для кремниевых от 0,3 до 1 В), так как потенциал базы отрицательный по отношению к потенциалу эмиттера и, следовательно, этот переход работает в прямом направлении. Отсюда ток покоя базы $I_{б.п} \approx E_k/R_b$.

Коллекторный ток покоя определяется через коэффициент усиления по току транзистора: $I_{к.п} = \beta I_{б.п} = \beta E_k/R_b$. Этот ток, проходя через резистор R_k , создает на нем падение напряжения, вычитая которое из напряжения E_k , получим напряжение покоя на транзисторе.

Если во входную цепь транзистора подается положительная полуволна переменного напряжения (со знаком плюс на рис. 1, б), коллекторный ток уменьшается и соответственно увеличивается по абсолютной величине отрицательное напряжение коллектор — эмиттер (см. рис. 1, б — кривые $u_{к.э}$ и $u_{вх}$). На нагрузочном сопротивлении R_n формируется при этом отрицательная полуволна напряжения значительно большей амплитуды, чем входное напряжение. При поступлении отрицательной полуволны входного напряжения транзистор приоткрывается, напряжение на нем падает по абсолютной величине и на нагрузке формируется положительная полуволна. Таким образом, полярность выходного напряжения одиночного каскада с общим эмиттером противоположна полярности входного сигнала в данный момент времени. Иногда говорят, что выходной и входной сигналы находятся в противофазе или сдвинуты на 180 электрических градусов.

Каскад с ОЭ производит усиление по току, напряжению и мощности. Так как изменения коллекторного тока в β раз больше изменений базового тока, происходит усиление по току. Для изменения базового тока требуются небольшие изменения входного напряжения, так как входное сопротивление перехода база — эмиттер, работающего в прямом направлении, мало (для малых сигналов это сопротивление лежит в пределах от 200 Ом до 2 кОм). В то же время сопротивление коллекторной

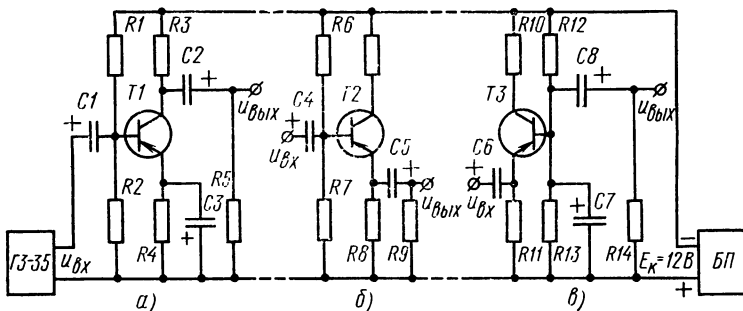


Рис. 2. Схемы подлежащих исследованию каскадов с общим эмиттером (а), коллектором (б) и базой (в)

нагрузки по переменному току, равное параллельному соединению R_K и R_H , составляет обычно единицы и десятки килоом. Следовательно, изменения коллекторного тока (в β раз больше изменений базового тока) приходится на сопротивление, равное или большее, чем входное. Это определяет усиление каскада по напряжению, причем, чем больше коэффициент β и больше сопротивление $R_K // R_H$, тем больше коэффициент усиления каскада.

Так как каскад с ОЭ усиливает ток и напряжение, он, естественно, усиливает и мощность, причем коэффициент усиления по мощности больше коэффициента усиления по току или напряжению.

Входное сопротивление каскада, как показано выше, мало, а выходное сопротивление равно примерно R_K .

Схема каскада с ОЭ, исследуемая в работе, показана на рис. 2, а. В нее для стабилизации рабочей точки транзистора T1 включена цепь эмиттерной стабилизации, состоящая из резисторов R2, R4 и конденсатора C3. Со-

вокупность резистора $R4$ и конденсатора $C3$ называется цепочкой автоматического смещения.

Каскад с общей базой показан на рис. 1, в. В этой схеме входной сигнал подается в эмиттерную цепь. Для создания тока покоя (режима по постоянному току) использован дополнительный источник напряжения смещения $E_{см}$. Напряжение эмиттер — база мало, так как переход работает в прямом включении. Поэтому ток покоя коллектора $I_K = \alpha E_{см} / R_{см}$, где α — коэффициент передачи эмиттерного тока. С приходом положительной полуволны входного напряжения суммарный ток эмиттера увеличивается и, следовательно, транзистор приоткрывается больше и уменьшается по абсолютной величине напряжение коллектор — база (см. рис. 1, г). На нагрузочном сопротивлении формируется положительная полуволна напряжения с амплитудой, большей, чем у входной полуволны. При поступлении отрицательной полуволны входного напряжения на нагрузочном резисторе формируется также отрицательная полуволна, только с большей амплитудой. Таким образом, полярность и фазы входного и выходного напряжений совпадают, т. е. говорят, что каскад с ОБ не инвертирует фазу.

Каскад с ОБ производит усиление только по напряжению и мощности. По току усиления нет, так как коэффициент передачи эмиттерного тока $\alpha < 1$. Эффект усиления по напряжению обусловлен той же причиной, что и в каскаде с ОЭ, так как входное сопротивление каскада с ОБ много меньше, чем R_K и R_H . Таким образом, чем больше β , R_K и R_H , тем больше усилие по напряжению и мощности. Входное сопротивление каскада с ОБ меньше, чем каскада с ОЭ, а выходное также примерно равно R_K .

Схема каскада с ОБ, исследуемая в работе и показанная на рис. 2, в, несколько отличается от схемы, показанной на рис. 1, в. В нее включена цепь автоматического смещения, состоящая из резистора $R13$ и конденсатора $C7$. Помимо стабилизации рабочей точки эта схема позволяет задать режим транзистора по постоянному току, используя лишь один источник питания.

Каскад с общим коллектором показан на рис. 1, д. Его основное отличие от каскадов с ОЭ и ОБ состоит в том, что нагрузка включена в эмиттерную цепь транзистора, чем вводится отрицательная обратная связь по току, которая существенно сказывается на параметрах

каскада. Начальное смещение (выбор точки покоя транзистора) задается током от источника E_k через резистор R_6 . С приходом положительной полуволны входного напряжения суммарный ток базы уменьшается, уменьшается также ток эмиттера и по абсолютной величине напряжения эмиттера относительно общей точки. На нагрузке формируется положительная полуволна напряжения (см. рис. 1, е), причем амплитуда выходного напряжения почти равна амплитуде входного. Отрицательной полуволне входного напряжения соответствует отрицательная полуволна выходного напряжения. Таким образом, каскад с ОК сохраняет фазу входного сигнала.

Каскад с ОК производит только усиление по току и мощности. Входной ток поступает на базу транзистора, следовательно, ток эмиттера в $\beta + 1$ раз больше — отсюда усиление по току. Усиления по напряжению в каскаде нет, так как изменения входного напряжения почти целиком передаются на выход через переход база — эмиттер, обладающий малым сопротивлением в прямом включении по сравнению с сопротивлениями R_3 и R_n . Выходное напряжение каскада с ОК имеет ту же фазу, что и входной сигнал и почти равно (немного меньше) ему по амплитуде. Усиление мощности достигается за счет усиления тока.

Входное сопротивление каскада по переменному току достаточно велико и лежит в пределах от десятков до сотен килоом. Выходное сопротивление эмиттерного повторителя мало и составляет единицы или десятки ом. Эмиттерный повторитель используют для согласования каскадов, имеющих малое входное и большое выходное сопротивления, а также как оконечный (выходной) каскад усилителей, работающих на низкоомную нагрузку.

Оборудование и аппаратура

Генератор низкой частоты ГЗ-35 с диапазоном частот от 20 Гц до 200 кГц и выходным напряжением от 0 до 8 В при нагрузке 600 Ом	1 шт.
Электронный осциллограф С1-49 или двухлучевой осциллограф С1-18	1 »
Стабилизатор напряжения постоянного тока Б5-7 с выходным напряжением 12 В при нагрузке до 100 мА	1 »

Транзисторы $T1-T3$ (МП40)	3 шт.
Резисторы: $R1, R12$ (МЛТ-0,5-12 кОм $\pm 5\%$)	2 »
$R2, R13$ (МЛТ-0,5-4,3 кОм $\pm 5\%$)	2 »
$R4, R11$ (МЛТ-0,5-1,2 кОм $\pm 5\%$)	2 »
$R3, R8, R10$ (МЛТ-0,5-1,5 кОм $\pm 5\%$)	3 »
$R5, R9, R14$ (МЛТ-0,5-10 кОм $\pm 5\%$)	3 »
$R6$ (МЛТ-0,5-22 кОм $\pm 5\%$)	1 »
$R7$ (МЛТ-0,5-30 кОм $\pm 5\%$)	1 »
Конденсаторы: $C1, C2, C4, C5, C8$ (К50-6-50-10 мкФ)	5 »
$C3, C6, C7$ (К50-6-25-50 мкФ)	3 »

Порядок выполнения работы

1. Подключить к схеме исследования каскадов (см. рис. 2) источник питания, установив на нем напряжение 12 В. Генератор ГЗ-35 и осциллограф подключаются поочередно к тому каскаду, который исследуют.

2. Определить коэффициент усиления по напряжению каскада с общим эмиттером на частотах 50 и 1000 Гц. Для чего, установив частоту выходного напряжения генератора ГЗ-35, равную 50 Гц, подключить его выход к входу каскада с ОЭ. Изменяя напряжение генератора, получить амплитуду выходного напряжения каскада, равную 1 В, измеряя ее осциллографом. Определив амплитуду входного напряжения (также с помощью осциллографа), вычислить коэффициент усиления каскада с общим эмиттером по напряжению на частоте 50 Гц и занести его значение в табл. 1. Определить указанным методом коэффициент усиления каскада на частоте 1000 Гц.

Таблица 1. Коэффициент усиления каскадов по напряжению

Каскад с ОЭ		Каскад с ОК		Каскад с ОБ	
K_U	f , Гц	K_U	f , Гц	K_U	f , Гц
	50 1000		50 1000		50 1000

3. Определить и записать в табл. 1 коэффициенты усиления по напряжению каскада с ОК на частотах 50 и 1000 Гц.

4. Определить и записать в табл. 1 коэффициент усиления по напряжению каскада с ОБ на частотах 50 и 1000 Гц.

5. Определить номинальную выходную мощность для каждого каскада на частоте 1000 Гц. Для чего, подключив генератор к исследуемому каскаду, увеличивать напряжение до тех пор, пока у кривой выходного напряжения каскада, наблюдаемой на экране осциллографа, не начнут срезаться вершины полувольт (хотя бы у одной полувольты). Измеряя амплитуду $U_{м.макс}$ выходного напряжения, определить его действующее значение по формуле $U_{д.макс} = U_{м.макс} / \sqrt{2}$, а затем, зная сопротивление нагрузки, определить номинальную выходную мощность по формуле

$$P_{вых.ном} = U_{д.макс}^2 / R_n$$

и занести ее значение в табл. 2. Определить $P_{вых.ном}$ для других каскадов.

Таблица 2. Номинальная выходная мощность каскадов

$P_{вых.ном}$	Каскад с ОЭ	Каскад с ОК	Каскад с ОБ

6. Пользуясь осциллографом, убедиться в том, что каскад с общим эмиттером меняет полярность входного сигнала (фазу сигнала), а каскады с ОК и ОБ не меняют.

Содержание отчета

1. Наименование отчета.
2. Название и технические данные использованных измерительных приборов.
3. Схемы исследованных каскадов с ОЭ, ОК, ОБ.
4. Табл. 1 и 2 с измеренными и рассчитанными параметрами каскадов.

Контрольные вопросы

1. Какой каскад называется усилительным?
2. В каком каскаде изменяется полярность входного напряжения: с ОБ, с ОЭ или с ОК, а в каком не изменяется?

3. Какой каскад не производит усиления по току: с ОБ, с ОЭ или с ОК?
4. Какой каскад обладает наибольшим усилением по мощности?
5. Для чего служат разделительные емкости в каскаде?
6. Какой каскад обладает большим входным сопротивлением?

Работа № 14. ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЬНОГО КАСКАДА НА ЭЛЕКТРОННОЙ ЛАМПЕ

Цель работы — ознакомиться с принципом работы и основными характеристиками усилителя переменного напряжения на электронной лампе.

Пояснения. Основными графическими характеристиками усилителя являются амплитудная и частотная ха-

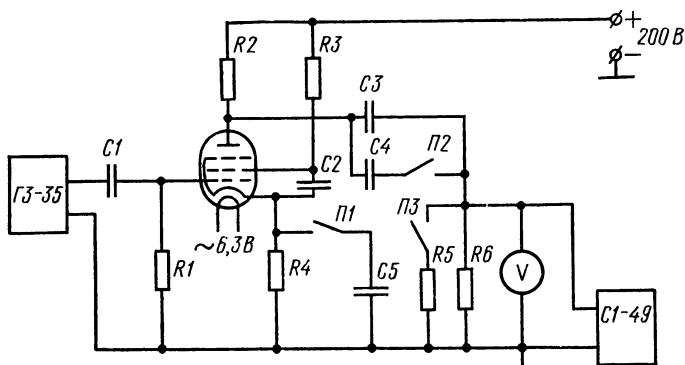


Рис. 1. Схема однокаскадного усилителя напряжения

рактеристики, выражающие зависимость выходного сигнала от уровня входного и коэффициента усиления от частоты входного сигнала.

В схеме однокаскадного усилителя напряжения, показанной на рис. 1, режим пентода (усилительного элемента) по постоянному току определяется сопротивлениями резисторов $R2$, $R3$ и $R4$. Собственно постоянное сеточное смещение задается напряжением на катодном резисторе $R4$. Так как в схеме предусмотрено отключение блокирующего конденсатора $C5$, образующего вместе с резистором $R4$ цепочку автоматического смещения, конденсатор в цепи экранной сетки подключен одной обкладкой к катоду, а не к общей точке, чтобы при отключенном конденсаторе $C5$ в напряжении экранная сетка — катод не появлялась переменная составляющая.

Если частота усиливаемого сигнала не ниже 100 Гц, влиянием на свойства усилителя разделительных конденсаторов можно пренебречь, так как их емкостные сопротивления достаточно малы. Однако, если в качестве второго разделительного используется только конденсатор $C3$ с малой емкостью (без конденсатора $C4$), на низких частотах характеристики усилителя видоизменяются:

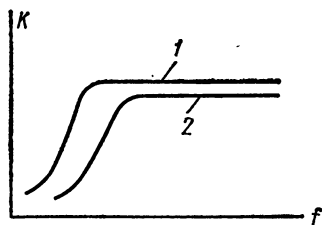


Рис. 2. Частотные характеристики каскада:

1 — при включенном конденсаторе $C4$, 2 — при отключенном конденсаторе $C4$

уменьшается коэффициент усиления и появляется значительный сдвиг фаз входного и выходного сигналов. Тот же самый эффект будет и при подключенном конденсаторе $C4$, когда частота входного сигнала будет менее 50 Гц. При этом уменьшению коэффициента усиления при уменьшении частоты будет способствовать как рост емкостного сопротивления конденсаторов $C1$ и $C4$, так и рост сопротивления

блокирующего конденсатора $C5$. Частотные характеристики каскада показаны на рис. 2. Следует отметить, что рост сопротивлений конденсаторов при уменьшении частоты сигнала приводит к уменьшению коэффициентов передачи разделительных цепочек $C1, R1$ и $C4, R6$, а увеличение емкостного сопротивления конденсатора $C5$ — к появлению отрицательной обратной связи в каскаде, так как сопротивление конденсатора становится сравнимым с сопротивлением резистора $R4$.

Включение резистора $R4$ при отсутствии конденсатора $C5$ обуславливает создание отрицательной последовательной обратной связи по току во всем диапазоне частот, так как через резистор протекает переменная составляющая тока. Естественным, что введение отрицательной обратной связи приводит к уменьшению коэффициента усиления каскада.

Оборудование и аппаратура

Генератор низкой частоты ГЗ-35	1 шт.
Электронный осциллограф С1-49	1 »
Ламповый вольтметр для измерения переменного напряжения ВК7-9	1 »

Источник питания: 200 В при токе 50 мА, 6,3 В при токе 1 А (УИП-2)	1 шт.
Электронная лампа 6Ж1П	1 »
Резисторы: $R1, R5, R6$ (МЛТ-0,5-470 $\text{кОм} \pm 5\%$) . . .	3 »
$R2$ (МЛТ-2-47 $\text{кОм} \pm 5\%$)	1 »
$R3$ (МЛТ-0,5-180 $\text{кОм} \pm 5\%$)	1 »
$R4$ (МЛТ-0,5-820 $\text{Ом} \pm 5\%$)	1 »
Конденсаторы: $C1, C2$ и $C4$ (МБМ-160-0,05 $\text{мкФ} \pm 10\%$)	3 »
$C5$ (К50-6-25-50 $\text{мкФ} \pm 5\%$)	1 »
Тумблеры $П1, П2$ и $П3$ (ТВ-2-1)	3 »

Порядок выполнения работы

1. Подключить согласно схеме (см. рис. 1) измерительную аппаратуру и источник питания, соблюдая указанную полярность напряжения.

2. Снять частотную характеристику усилителя без обратной связи при подключенном конденсаторе $C4$, когда переключатели $П1$ и $П2$ замкнуты, а $П3$ разомкнут. Показания приборов занести в табл. 1. После снятия

Т а б л и ц а 1. Частотная характеристика усилителя без обратной связи с подключенным конденсатором $C4$

	$f, \text{Гц}$	20	. . .	10 000
$U_{\text{вх}} = \dots \text{В}$	$U_{\text{вых}}, \text{В}$		. . .
	$K = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$		. . .

характеристики следует подсчитать коэффициенты усиления для разных частот и построить график частотной характеристики в логарифмическом масштабе. Перед снятием характеристики следует установить на частоте 1000 Гц такое напряжение генератора, при котором еще отсутствуют искажения в выходном сигнале усилителя, контролируемом с помощью осциллографа. Это напряжение измеряют вольтметром и далее поддерживают неизменным. Интервалы изменения частот в диапазоне от 20 до 120 Гц должны составлять 20 Гц, а далее — 500 Гц, вплоть до частоты 10 кГц.

Частотная характеристика строится в прямоугольных координатах, причем по оси абсцисс откладывают частоту в логарифмическом масштабе ($\lg f$), а по оси орди-

Т а б л и ц а 2. Частотная характеристика усилителя без обратной связи с отключенным конденсатором C_4

	$f, \text{ Гц}$	20	...	10 000
$U_{\text{вх}} = \dots \text{ В}$	$U_{\text{вых}}, \text{ В}$		...
	$K = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}$		...

нат — значения коэффициентов усиления в децибелах, т. е. $K_0, \text{ дБ} = 20 \lg K$, где $K = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}$.

3. Снять частотную характеристику усилителя без обратной связи при отключенном конденсаторе C_4 , когда переключатели $П2$ и $П3$ разомкнуты, а $П1$ замкнут. Показания приборов занести в табл. 2. После снятия характеристики следует подсчитать коэффициенты усиления для разных частот и построить график частотной характеристики в логарифмическом масштабе. При снятии и построении характеристики руководствоваться указаниями п. 2. Частотные характеристики строятся на одном чертеже.

4. Снять амплитудную характеристику усилителя без обратной связи, когда переключатели $П1$ и $П2$ замкнуты, а $П3$ разомкнут. Результаты измерений записать в табл. 3.

Т а б л и ц а 3. Амплитудная характеристика усилителя без обратной связи

$U_{\text{вх}},$									
$U_{\text{вых}}, \text{ В}$									$K_{\text{ср}} = \dots$

После снятия характеристики построить ее по данным табл. 2 и определить средний коэффициент усиления. Характеристику снимают на частоте 1000 Гц. Интервалы изменения входного напряжения должны охватывать диапазон от нуля до максимального значения, при котором появляются заметные искажения в кривой выходного сигнала. Интервалы изменения входного напряжения должны быть таковы, чтобы интервалы изменения выходного напряжения составляли 5 В. Входное и выходное напряжения измеряют вольтметром. Средний коэффици-

ент усиления определяют следующим образом. Через точки на графике, отражающие результаты измерения, и начало координат проводится прямая линия; отношение выходного напряжения к входному для любой точки, лежащей на этой линии, будет соответствовать значению среднего коэффициента усиления.

5. Снять и построить амплитудную характеристику усилителя с обратной связью по току, когда переключатели *П1* и *П3* разомкнуты, а *П2* замкнут. Результаты измерений занести в табл. 4. Эту характеристику построить на том же чертеже, что и предыдущую, и определить средний коэффициент усиления. После построения обеих характеристик, необходимо выяснить влияние обратной связи на коэффициент усиления.

Т а б л и ц а 4. Амплитудная характеристика усилителя с обратной связью

$U_{вх}, В$									$K_{ср} = \dots$
$U_{вых}, В$									

6. Определить коэффициенты усиления на частоте 1000 Гц усилителя без обратной связи, когда переключатели *П1*, *П2* и *П3* замкнуты, что соответствует работе усилителя с дополнительной нагрузкой *Р5* и усилителя с обратной связью и дополнительной нагрузкой, когда переключатели *П2*, *П3* замкнуты, а *П1* разомкнут. При определении коэффициента усиления уровень входного сигнала должен быть такой, при котором отсутствуют искажения кривой выходного напряжения, даже при подключении резистора *Р5*. Пользуясь полученными значениями коэффициентов усиления с дополнительной нагрузкой и данными, полученными в пп. 4 и 5, определить, в каком случае относительное изменение коэффициента усиления больше при подключении дополнительной нагрузки: когда действует или не действует обратная связь.

Содержание отчета

1. Наименование отчета.
2. Название и технические данные использованных измерительных приборов.

3. Схема исследованного каскада.

4. Табл 1, 2, 3 и 4 с измеренными и рассчитанными параметрами.

5. Значения коэффициентов усиления с указанием условий их измерения.

Контрольные вопросы

1. Каковы основные характеристики усилителя?
2. Как создается сеточное смещение в исследованной схеме?
3. Как влияет на вид частотной характеристики усилителя уменьшение емкостей разделительных конденсаторов?
4. Почему в схеме, показанной на рис. 1, конденсатор экранной сетки подключен к катоду лампы?
5. Как влияет на коэффициент усиления каскада отключение конденсатора $C5$?

Работа № 15. ИССЛЕДОВАНИЕ ОДИНОЧНОГО КАСКАДА С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ В КЛЮЧЕВОМ РЕЖИМЕ

Цель работы — изучить принцип действия и исследовать статические характеристики транзисторного ключа.

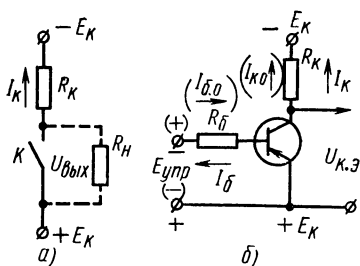


Рис. 1. Схемы ключей:
а — механического, б — простейшего транзисторного

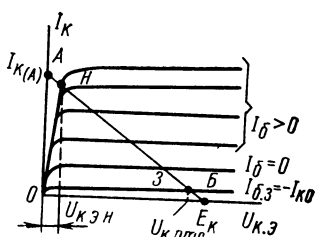


Рис. 2. Семейство выходных характеристик транзисторного ключа, включенного по схеме с общим эмиттером

Пояснения. Ключом называется схема, выполняющая замыкание или размыкание электрической цепи и управляемая входными сигналами. Такая схема аналогична механическому контакту (рис. 1, а), который замыкает или размыкает цепь. Из рис. 1, а видно, что при замыкании ключа выходное напряжение $U_{\text{вых.з}} = 0$, а ток через резистор R_k равен $I_{k.з} = E_k / R_k$; при размыкании ключа $U_{\text{вых.р}} = E_k$, а ток $I_{k.р} = 0$. Приведенные условия характе-

ризуют качество работы «идеального» ключа, которое оценивается в первую очередь минимальным падением напряжения на нем в замкнутом состоянии (в данном случае $U_{\text{вых.з}}=0$) и минимальным током в разомкнутом состоянии (в данном случае $I_{\text{к.р}}=0$).

Транзисторный ключ имеет ряд схемных вариантов, простейший из которых приведен на рис. 1, б. Активная нагрузка $R_{\text{к}}$ включена в коллекторную цепь, а управляющий сигнал поступает от источника $E_{\text{упр}}$ через сопротивление $R_{\text{б}}$. Статический режим схемы определяется характеристиками транзистора в схеме с общим эмиттером напряжениями $E_{\text{к}}$ и $E_{\text{упр}}$ и сопротивлениями резисторов $R_{\text{б}}$ и $R_{\text{к}}$. Будем считать положительным для базы такой ток, который вытекает из нее, т. е. потенциал базы отрицателен относительно эмиттера*. Если в базе течет ток $I_{\text{б}}$, то в коллекторе ток $I_{\text{к}}=\beta I_{\text{б}}$, где β — коэффициент передачи базового тока в транзисторе. Ток $I_{\text{к}}$, проходя через сопротивление $R_{\text{к}}$, создает на нем падение напряжения $U_{\text{к}}=I_{\text{к}}R_{\text{к}}$ и, следовательно, выходное напряжение ключа $U_{\text{к.э}}=E_{\text{к}}-I_{\text{к}}R_{\text{к}}$. Отсюда $I_{\text{к}}=E_{\text{к}}/R_{\text{к}}-U_{\text{к.э}}/R_{\text{к}}$. Построим эту зависимость $I_{\text{к}}=f(U_{\text{к.э}})$ в тех же координатах, что и характеристики транзистора в схеме с ОЭ (рис. 2). Так как эта зависимость линейная, достаточно найти только две точки. При $U_{\text{к.э}}=0$ получим координату точки А на оси токов: $I_{\text{к(А)}}=E_{\text{к}}/R_{\text{к}}$, а при $I_{\text{к}}=0$ — координату точки В на оси напряжений: $U_{\text{к.э В}}=E_{\text{к}}$. Линия, проведенная через эти две точки, называется линией статической нагрузки. Угол наклона α этой линии зависит от сопротивления $R_{\text{к}}$ и определяется из прямоугольного треугольника OAB : $\text{ctg } \alpha=R_{\text{к}}$.

Очевидно, что рабочая точка транзистора (совокупность $U_{\text{к.э}}$ и $I_{\text{к}}$) должна лежать одновременно на линии статической нагрузки (между точками Н и З) и на какой-либо кривой из семейства его выходных характеристик, так как именно эти характеристики устанавливают количественную связь между токами коллектора и базы и напряжением $U_{\text{к.э}}$ в транзисторе. Другими словами, задавая ток базы, мы выбираем определенную кривую из семейства выходных характеристик транзистора; место пересечения этой кривой с линией статической нагрузки определяет положение рабочей точки. Для усилительного

* Здесь и далее рассматривается ключевая схема на транзисторе прямой проводимости p - n - p -типа.

каскада траектория рабочей точки при работе схемы лежит между точками H и $З$.

Ключевой режим работы каскада характерен тем, что рабочими являются два состояния транзистора: открытое — режим насыщения и закрытое — режим отсечки. Переход транзистора из одного состояния в другое осуществляется переключением полярности напряжения $E_{упр}$. Так, при отрицательной полярности $E_{упр}$ относительно эмиттера транзистор открыт. Если мгновенно переключить полярность $E_{упр}$ на положительную, транзистор быстро закроется. Обратное переключение полярности снова вызовет открывание транзистора. Скорость перехода из одного состояния в другое при резком изменении полярности $E_{упр}$ определяется частотными свойствами транзистора.

Открытое состояние транзистора соответствует точке H на рис. 2. В этом состоянии на обоих переходах транзистора прямые напряжения. Из базы вытекает ток насыщения

$$I_{б.н} = E_{упр}/R_б, \quad (1)$$

причем полярность $E_{упр}$ указана без скобок на рис. 1, б. Дальнейшее увеличение базового тока практически не приводит к уменьшению напряжения насыщения $U_{к.э.н}$. Это напряжение для германиевых транзисторов при токе $I_k \leq 50$ мА не превосходит 0,2—0,3 В, а для кремниевых — 0,3—1 В. Коллекторный ток насыщения в точке H без учета малого напряжения $U_{к.э.н}$

$$I_{к.н} = E_k/R_k. \quad (2)$$

Так как $I_k = \beta I_b$, условие насыщения транзистора будет иметь вид

$$I_{к.н} = \beta I_{б.н} \quad (3)$$

или

$$I_{б.н} = E_k/\beta R_k.$$

С учетом выражения (1) можно записать соотношение для сопротивлений $R_б$ и R_k , которое при заданных $E_{упр}$ и E_k обеспечивает режим насыщения:

$$E_{упр}/R_б = E_k/\beta R_k \quad \text{или} \quad R_б/R_k = E_{упр}\beta/E_k.$$

Таким образом, если $E_{упр} = E_k$ (резистор $R_б$ подключен к источнику E_k), то $R_б = \beta R_k$. Для обеспечения более

глубокого насыщения в практических схемах ток базы должен быть больше $I_{б.п.}$. Отсюда $R_6 \leq \beta R_k$. Для разных по величине $E_{упр}$ и E_k условие насыщения транзистора выглядит так:

$$R_6 \leq \beta R_k E_{упр} / E_k \quad (4)$$

Закрытое состояние транзистора соответствует точке 3 на рис. 2. В этом состоянии на обоих переходах транзистора обратные напряжения, т. е. полярность источника $E_{упр}$ (указана в скобках) противоположна его полярности в режиме насыщения. Так как оба перехода транзистора закрыты, через него течет только обратный ток $I_{к0}$. Обратный ток базы практически равен обратному току коллектора и втекает в базу. Следовательно, напряжение $U_{к.э.з}$ на закрытом транзисторе в режиме отсечки равно приблизительно E_k . Так, у германиевых транзисторов при комнатной температуре ток $I_{к0}$ лежит в пределах от единиц до десятков микроампер, а сопротивление R_k в транзисторных ключах составляет единицы или десятки килоом, следовательно, напряжение $I_k R_k$ составляет сотые и десятые доли вольта, т. е. обычно много меньше E_k . У кремниевых транзисторов $I_{к0}$ лежит в пределах от десятых долей до единиц микроампер, т. е. еще меньше. Отметим, что если ток в цепи базы транзистора равен нулю, через него протекает сквозной ток $I_{скв} = \beta I_{к0}$, который может иметь большую величину. Следовательно, в этом случае транзистор закрыт не полностью и для полного его закрытия необходимо ввести в базу отрицательный ток. При этом режим отсечки характеризуется условием

$$E_{упр} / R_6 \geq I_{к0}. \quad (5)$$

Таким образом, в отличие от идеального ключа транзисторный ключ в насыщенном (замкнутом) состоянии имеет остаточное падение напряжения $U_{к.э.н.}$; в закрытом (в разомкнутом) состоянии ток через ключ также отличен от нуля, но много меньше, чем рабочий ток, т. е. качество транзисторного ключа несколько хуже контактного из-за наличия остаточных параметров $U_{к.э.н.}$ и $I_{к0}$. Несомненное преимущество транзисторного ключа по сравнению с контактным в том, что у него процесс переключения может происходить со значительно большей скоростью (частотой). Этим объясняется широкое использование транзисторного ключа.

Схема нормально открытого ключа на кремниевом транзисторе, подлежащая исследованию, показана на рис. 3, а. Режим насыщения транзистора $T1$ обусловлен током от источника питания E_K через резистор $R2$. Чтобы переключить транзистор в режим отсечки, необходимо подать на схему положительное входное напряжение:

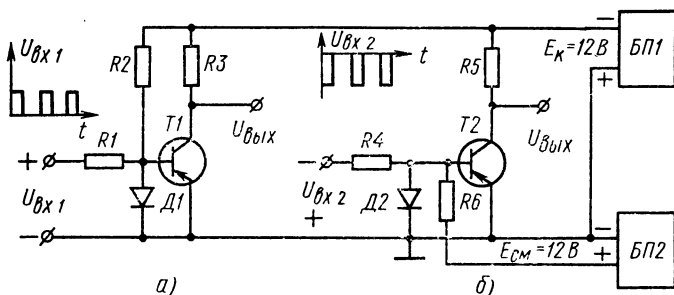


Рис. 3. Схемы ключей:

а — нормально открытого на кремниевом транзисторе, б — нормально закрытого на германиевом транзисторе

$U_{вх1}$. Минимальное значение этого напряжения должно быть таково, чтобы возможный суммарный ток базы был больше I_{K0} :

$$U_{вх1} \geq I_{K0}R1 + E_K R1/R2. \quad (6)$$

Схема нормально закрытого ключа на германиевом транзисторе, подлежащая исследованию, показана на рис. 3, б. Режим отсечки транзистора $T2$ обусловлен подачей положительного смещения на базу от источника напряжения смещения $E_{см}$ через резистор $R6$. Чтобы переключить транзистор в режим насыщения, необходимо подать отрицательное входное напряжение $U_{вх2}$. При этом минимальное значение этого напряжения должно быть таково, чтобы суммарный базовый ток транзистора был больше тока насыщения базы:

$$U_{вх2} \geq (E_K R4/\beta R5) + E_{см} R4/R6. \quad (7)$$

В данной работе в качестве управляющих входных напряжений для ключей используют импульсное прямоугольное напряжение от внешнего генератора импульсов, причем полярность импульсов устанавливают в зависи-

мости от исследуемой схемы. Диоды $D1$ и $D2$ необходимы для ограничения обратных напряжений на переходах транзисторов. Выходные напряжения ключей и их токи контролируются и измеряются с помощью осциллографа, работающего с открытым входом.

Оборудование и аппаратура

Малогабаритный генератор импульсов Г5-15	1 шт.
Электронный осциллограф с открытым входом С1-49	1 »
Стабилизатор напряжения постоянного тока Б5-7 с выходным напряжением 12 В при нагрузке до 20 мА	2 »
Транзисторы: $T1$ (МП114)	1 »
$T2$ (МП21Е)	1 »
Полупроводниковые диоды $D1$ и $D2$ (Д226)	2 »
Резисторы: $R1$ и $R4$ (МЛТ-0,5-51 кОм \pm 5%)	2 »
$R3$ и $R5$ (МЛТ-0,5-10 кОм \pm 5%)	2 »
$R2$ и $R6$ (МЛТ-0,5-82 кОм \pm 5%)	2 »

Порядок выполнения работы

1. Подключить к схемам ключей (см. рис. 3, *а* и *б*) источник питания, соблюдая указанную полярность, и установить на них напряжения 12 В.

2. Определить остаточный ток ключа на германиевом транзисторе. Для чего необходимо:

замкнуть открытый вход осциллографа и установить изображение горизонтальной линии в центре экрана на определенной риске — это положение линии будет соответствовать нулевому уровню входного напряжения;

подключить открытый вход осциллографа параллельно коллекторной нагрузке $R5$ исследуемого ключа;

при отсутствии входных импульсов измерить падение напряжения U_{R5} на резисторе $R5$, устанавливая необходимую чувствительность осциллографа; значение напряжения определяется при известной чувствительности осциллографа расстоянием от нового места расположения горизонтальной линии на экране до линии нулевого уровня;

вычислить значение остаточного тока $I_{ост Ge}$ ключа по известному напряжению U_{R5} и сопротивлению резистора $R5$.

3. Определить остаточное напряжение ключа на германиевом транзисторе в импульсном режиме. Для чего необходимо:

установить линию нулевого уровня в центре экрана осциллографа; подключить его открытый вход к выходным клеммам ключа (параллельно транзистору T_2);

подключить генератор к входу ключа, установив требуемую полярность импульсов (показана на рис. 3, б); установить частоту импульсов 10 000 Гц, а длительность 10 мкс;

увеличить амплитуду импульсов генератора до такого значения, при котором прекращается заметный дальнейший рост выходных импульсов ключа, наблюдаемых на экране осциллографа (рис. 4);

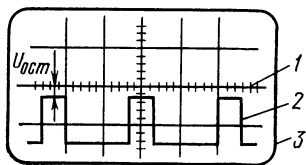


Рис. 4. Выходные импульсы ключа на экране осциллографа:

1 — линия нулевого уровня, 2 — сигнал, 3 — экран

установить необходимую чувствительность канала вертикального отклонения осциллографа, позволяющую измерить расстояние от вершины импульсов до линии нулевого уровня 1; обратить внимание на то, что часть изображения сигнала 2 при этом может вый-

ти за нижнюю границу экрана 3; расстояние от вершины импульсов до нулевой линии и будет определять остаточное напряжение ключа $U_{ост}$ в насыщенном режиме. Записать значение $U_{ост Ge}$.

4. Определить остаточное напряжение нормально открытого ключа (т. е. ключа, который открыт до прихода управляющего сигнала) на кремниевом транзисторе. Для этого необходимо при отсутствии входного сигнала, пользуясь описанными выше приемами, измерить с помощью осциллографа напряжение $U_{ост si}$ на транзисторе T_1 .

5. Определить экспериментально для обоих ключей и записать в таблицу минимальные значения амплитуд входных импульсов, которые обеспечивают переключение транзисторов из одного состояния (отсечки или насыщения) в другое (насыщения или отсечки). Для чего необходимо:

подключить генератор к входу ключа, установив требуемую полярность импульсов; осциллограф подключить к выходу этого же ключа;

установить частоту импульсов генератора 10 кГц, а длительность импульсов 10 мкс;

Т а б л и ц а. Длительность фронтов выходных импульсов ключей

Нормально открытый ключ			Нормально закрытый ключ		
Амплитуда входного импульса, В	Фронт, мкс	Срез, мкс	Амплитуда входного импульса, В	Фронт, мкс	Срез, мкс

увеличивать амплитуду импульсов до такого значения, при котором начинает прекращаться рост выходных импульсов ключа, наблюдаемых на экране осциллографа; измерить амплитуду входных импульсов с помощью отсчетного устройства генератора или осциллографа.

6. Определить с помощью осциллографа длительность фронта и среза выходных импульсов обоих ключей. Обратит внимание, что изображения выходных импульсных напряжений взаимно перевернуты. Значения длительностей фронтов и срезов записать в таблицу.

7. Определить расчетным путем необходимые амплитуды входных импульсов исследуемых ключей $U_{вх.Т1}$ и $U_{вх.Т2}$, обеспечивающие переключение транзисторов при $\beta=20$, $I_{к0}=50$ мкА. При расчете входного напряжения для нормально открытого ключа воспользоваться формулой (6). Расчет напряжения для переключения нормально закрытого ключа выполняют по формуле (7).

Содержание отчета

1. Наименование отчета.
2. Название и технические данные использованных измерительных приборов.
3. Схемы исследуемых ключей на кремниевом и германиевом транзисторах.
4. Расчетные и экспериментально определенные параметры ключей: остаточное напряжение, остаточный ток, требуемые амплитуды входных импульсов.
5. Таблица с результатами измерений длительности фронтов.

Контрольные вопросы

1. Какая точка на рис. 2 соответствует насыщенному состоянию ключа: H или $З$?
2. Какой полярности должно быть напряжение $E_{упр}$ относительно эмиттера, чтобы ключ на транзисторе $n-p-n$ -типа был открыт?
3. Какие параметры транзисторного ключа называются остаточными?
4. Каковы преимущества и недостатки транзисторного ключа по сравнению с контактным?

Работа № 16. ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЯ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ НА ТРАНЗИСТОРАХ

Цель работы — ознакомиться с принципом действия и основными характеристиками низкочастотного усилителя переменного напряжения с резистивно-емкостными связями.

Пояснения. Усилители низкой частоты используются для усиления электрических сигналов в полосе частот от 20 до 20 000 Гц.

Рассмотрим параметры транзисторного усилителя напряжения низкой частоты с резистивно-емкостными связями (рис. 1). Как видно из схемы, связи между источником усиливаемого напряжения и входом усилителя, между каскадами и между выходом усилителя и нагрузкой осуществляются цепочками RC . Наличие конденсаторов $C1$ и $C2$ позволяет разделить каскады по постоянному току (т. е. режим покоя каждого каскада не зависит от параметров и режима покоя другого каскада) и обеспечить связь по переменному. Цепь нагрузки $R12$ отделена по постоянному току от выходного каскада конденсатором $C3$, т. е. напряжение покоя выходного каскада не создает постоянного тока в нагрузке.

Свойства усилителя, так же как и свойства составляющих его каскадов, характеризуются следующими показателями: коэффициентами усиления по напряжению, мощности или току, полосой пропускания, номинальным выходным напряжением или мощностью, к. п. д., коэффициентами вносимых искажений (частотных, фазовых, нелинейных), входным и выходным сопротивлениями. Основными графическими характеристиками усилителя являются амплитудная и частотная.

Амплитудная характеристика — это зависимость выходного напряжения усилителя от уровня входного. По этой характеристике судят о линейности усилителя,

т. е. о постоянстве коэффициента усиления для разных уровней входного сигнала. Нелинейность транзисторного усилителя обусловлена зависимостью параметров усилительного элемента (в основном коэффициента усиления базового тока и входного сопротивления) от режима работы. Непостоянство коэффициента усиления при изменении уровня входного напряжения приводит к появлению нелинейных искажений.

Частотная характеристика — это зависимость коэффициента усиления от частоты усиливаемого сигнала.

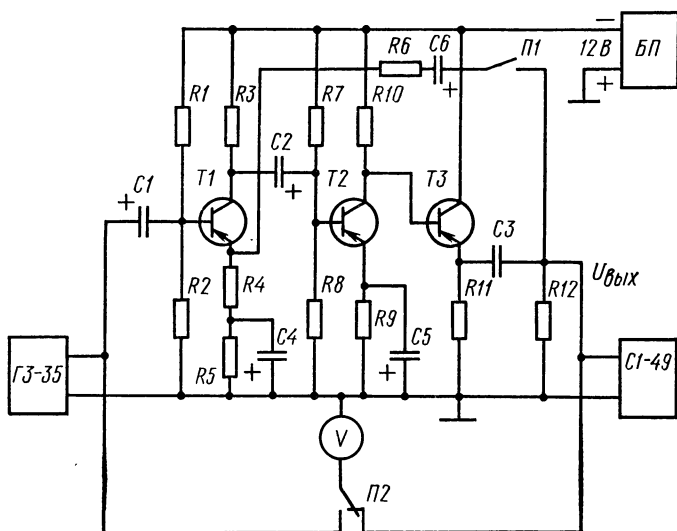


Рис. 1. Схема исследования транзисторного усилителя напряжения низкой частоты

По этой характеристике судят о постоянстве коэффициента усиления в рабочей полосе частот входного сигнала. Снижение коэффициента усиления на низких частотах обусловлено в основном ростом емкостных сопротивлений разделительных конденсаторов и конденсаторов в цепях автоматического смещения (см. работу № 14), а на высоких — уменьшением коэффициента передачи базового тока, влиянием емкости коллекторного перехода и паразитных емкостей.

Для низкочастотных усилителей рабочий диапазон частот занимает полосу от десятков герц до десятков ки-

логерц, а для широкополосных — он еще более широкий. Поэтому построение частотных характеристик для таких усилителей в обычном линейном масштабе неудобно и нецелесообразно, так как, если масштаб по оси частот будет составлять десятки или единицы герц на единицу длины, для всей характеристики потребуется очень большой размер графика, а при масштабе единицы или десятки килогерц на единицу длины будет невозможно проследить ход кривой частотной характеристики в каком-нибудь узком (но необходимом) диапазоне частот.

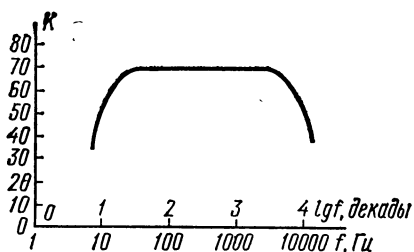


Рис. 2. Частотная характеристика усилителя в полулогарифмическом масштабе

значений частот, т. е. $lg f$. Масштабным в этом случае будет отрезок, соответствующий десятикратному изменению частоты (рис. 2). Эти равные отрезки (интервалы) между частотами, отличающимися в 10 раз, называются декадами. На оси частот обычно сверху указывают числа, соответствующие логарифмам значений частот (или номера декад), а снизу — значения частот в герцах.

Для полулогарифмического масштаба на оси ординат откладывают натуральные значения коэффициента усиления, а для логарифмического — значения коэффициента усиления в децибелах, т. е. $k = 20 \lg K$, где $K = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$; $U_{\text{вх}}$ и $U_{\text{вых}}$ соответственно входное и выходное напряжения усилителя. Следует отметить, что построение частотных характеристик в полном логарифмическом масштабе удобнее, так как, если известны логарифмические характеристики отдельных каскадов усилителя, его полную логарифмическую характеристику находят сложением характеристик отдельных звеньев. Кроме того, уровню усиления в 0 децибел соответствует коэффициент усиления, равный 1.

Для улучшения показателей работы усилителя применяют обратные связи. Передачу части энергии из выходной цепи усилителя на его вход называют обратной связью. Обратная связь бывает положительной и отрицательной в зависимости от того, совпадают по фазе или находятся в противофазе входной сигнал и сигнал обратной связи. Если напряжение обратной связи пропорционально напряжению на нагрузке, имеет место обратная связь по напряжению, а если напряжение обратной связи пропорционально току нагрузки — это обратная связь по току. Если на входе усилителя происходит алгебраическое суммирование входного напряжения и напряжения обратной связи, — это последовательная обратная связь. При суммировании на входе усилителя входного тока и тока цепи обратной связи имеет место параллельная обратная связь.

Наличие обратных связей в усилителе существенно влияет на его амплитудную и частотную характеристики, а также на значения входного и выходного сопротивлений. Так, отрицательная обратная связь увеличивает входное и уменьшает выходное сопротивления, повышает стабильность коэффициента усиления и расширяет полосу пропускания усилителя, что является положительным свойством отрицательной обратной связи. В то же время введение отрицательной обратной связи снижает коэффициент усиления, что является ее отрицательным свойством. Положительная обратная связь в усилителях применяется сравнительно редко, но широко используется при создании разного рода генераторов.

На схеме исследования транзисторного усилителя напряжения низкой частоты (см. рис. 1) показан трехкаскадный усилитель с резистивно-емкостными связями. Емкости конденсаторов $C1—C6$ имеют такие значения, что их емкостными сопротивлениями в диапазоне частот от 100 Гц и выше можно пренебречь, т. е. в этой области частот они не оказывают влияния на фазовые характеристики усилителя. Последний каскад — эмиттерный повторитель. Включение цепи обратной связи ($C6R6$) производится переключателем $P1$. Переключатель $P2$ обеспечивает подключение вольтметра к входу или выходу усилителя. Входное напряжение подается от генератора напряжения низкой частоты ГЗ—35. Форму выходного напряжения усилителя контролируют с помощью осциллографа.

Оборудование и аппаратура

Генератор низкой частоты ГЗ-35 с диапазоном частот от 20 до 20 000 Гц и выходным напряжением от 0 до 8 В	1 шт.
Электронный осциллограф С1-49	1 »
Стабилизатор напряжения постоянного тока с выходным напряжением 12 В при нагрузке 50 мА (Б5-7)	1 »
Ламповый вольтметр V (ВК7-8)	1 »
Ампервольтметр Р386 с пределами измерения по переменному напряжению от 1 до 300 В	1 »
Транзисторы: Т1—Т3 (МП21Е)	3 »
Резисторы: R1 и R7 (МЛТ-0,5-12 кОм±5%)	2 »
R2 и R8 (МЛТ-0,5-4,3 кОм±5%)	2 »
R3 и R10 (МЛТ-0,5-1,5 кОм±5%)	2 »
R4 (МЛТ-0,5-520 Ом±5%)	1 »
R5 (МЛТ-0,5-750 Ом±5%)	1 »
R9 и R11 (МЛТ-0,5-1,2 кОм±5%)	1 »
R6 (МЛТ-0,5-10 кОм±5%)	1 »
R12 (МЛТ-0,5-8,2 кОм±5%)	1 »
Конденсаторы: C1 и C2 (К50-6-50-10 мкФ)	2 »
C4, C5 и C6 (К50-6-25-50 мкФ)	3 »
C3 (МБМ-160-1,0 мкФ)	1 »
Тумблеры П1 и П2 (ТВ-2-1)	2 »

Порядок выполнения работы

1. Подключить к исследуемому усилителю (см. рис. 1) измерительную аппаратуру и блок питания, установив на его выходе 12 В.

2. Снять амплитудную характеристику усилителя без обратной связи. Для чего, разомкнув переключатель П1, установив частоту напряжения генератора, равную 1000 Гц, и изменяя выходное напряжение генератора примерно одинаковыми интервалами от нуля до значения, при котором появляются искажения на выходе усилителя, измерить и записать в табл. 1 соответствующие друг другу значения входного и выходного напряжений (интервалы изменения напряжения генератора выбирают такими, чтобы выходное напряжение усилителя изменялось примерно на 0,5 В). По данным табл. 1 подсчитать значения коэффициентов усиления по напряжению и занести в эту же таблицу.

3. Снять частотную характеристику усилителя без обратной связи. Для чего, установив и поддерживая выходное напряжение генератора на уровне, соответствующем максимальному (без искажений) выходному напряжению, и изменяя частоту генератора от нижнего до верх-

**Т а б л и ц а 1. Амплитудная характеристика усилителя
без обратной связи**

$U_{вх}, В$	
$U_{вых}, В$	
K_U	

него предела, измерить и записать в табл. 2 значения выходного напряжения. Значение входного напряжения также записать в табл. 2. По данным табл. 2 подсчитать значения коэффициентов усиления по напряжению для разных частот и записать в эту же таблицу.

**Т а б л и ц а 2. Частотная характеристика усилителя
без обратной связи**

		$f, Гц$	20	50	100	200	500	1000	3000	5000	10 000	20 000
$U_{вх} = \dots В$	$U_{вых}, В$											
	K_U											

4. Снять амплитудную характеристику усилителя с отрицательной обратной связью по напряжению. Характеристику снимают при включенном переключателе *П1*. Остальные операции аналогичны указанным в п. 2. Показания приборов занести в табл. 3.

**Т а б л и ц а 3. Амплитудная характеристика усилителя
с обратной связью**

$U_{вх}, В$	
$U_{вых}, В$	
K_U	

5. Снять частотную характеристику усилителя с отрицательной обратной связью и занести результаты измерений и расчетов в табл. 4.

Таблица 4. Частотная характеристика усилителя с обратной связью

$U_{\text{вх}} = \dots \text{В}$	$f, \text{Гц}$	20	50	100	200	500	1000	3000	5000	10 000	20 000
	$U_{\text{вых}}, \text{В}$										
	K_U										

6. По данным табл. 1—4 построить на двух чертежах характеристики усилителя без обратной связи и с ней, причем частотные характеристики построить в полулוגарифмическом масштабе.

Содержание отчета

1. Наименование отчета.
2. Название и технические данные использованных измерительных приборов.
3. Схема низкочастотного усилителя, исследованного в работе.
4. Табл. 1—4 с результатами снятия частотных и амплитудных характеристик.
5. Амплитудные и частотные характеристики исследованного усилителя.

Контрольные вопросы

1. Как создается отрицательная обратная связь в схеме усилителя?
2. Как сказывается на коэффициенте усиления введение отрицательной обратной связи?
3. Какая характеристика усилителя называется амплитудной и какая частотной?
4. Влиянием каких емкостей обусловлено изменение коэффициента усиления переменного напряжения на низких частотах: разделительных или блокирующих в цепях автоматического смещения, или теми и другими вместе?
5. Чем вызываются нелинейные искажения в усилителе?

Работа № 17. ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХТАКТНОГО УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ

Цель работы — изучить принцип действия и исследовать основные характеристики двухтактного усилителя мощности с трансформаторными связями, работающего в классе *B*.

Пояснения. Транзисторные усилители мощности обычно проектируют по двухтактной схеме, работающей в

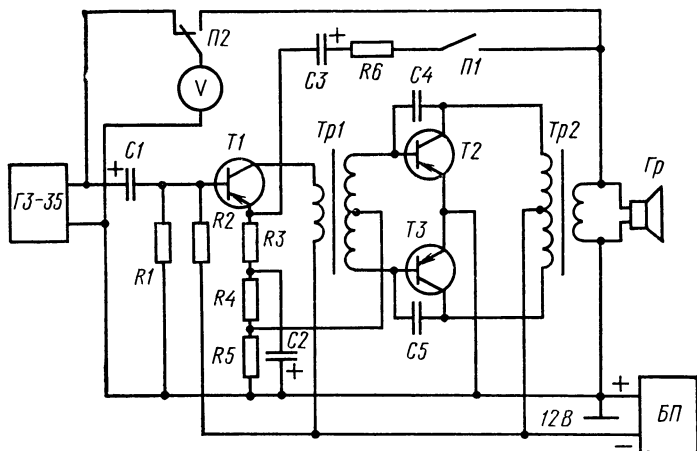


Рис. 1. Схема двухтактного усилителя низкой частоты радиоприемника «Сокол»

классе *B*, так как этот режим более экономичен и позволяет получить большую выходную мощность при заданных ограничениях на транзисторы, чем режим класса *A*.

На рис. 1 показана схема двухтактного усилителя низкой частоты радиоприемника «Сокол», подлежащая исследованию. Как видно из рисунка, эта схема имеет предварительный каскад усиления на транзисторе *T1*, включенном по схеме с общим эмиттером. Коллекторной нагрузкой транзистора является согласующий трансформатор *Tr1*. Режим покоя транзистора в основном определяется сопротивлениями резисторов *R1*, *R2* и *R4*. Входной сигнал переменного тока подается относительно общей точки через конденсатор *C1*. Выходной каскад усилителя собран на двух транзисторах *T2* и *T3*, включенных

по схеме с общим эмиттером. Коллекторными нагрузками транзисторов являются обмотки выходного трансформатора *Тр2*. Нагрузкой усилителя служит громкоговоритель *Гр* (или его эквивалент). Необходимое начальное смещение транзисторов *T2* и *T3* осуществляется напряжением, снимаемым с резистора *R5*. Основная цель этого смещения — уменьшить входные сопротивления транзисторов при малых уровнях входных сигналов и тем самым увеличить коэффициент усиления на этих уровнях и уменьшить нелинейные искажения.

Для большей стабильности коэффициента усиления всего усилителя и уменьшения частотных и нелинейных искажений он охвачен отрицательной последовательной обратной связью по переменному напряжению: цепочка *R6*, *C3*, *R3*. Как известно из теоретического курса, коэффициент усиления усилителя с отрицательной обратной связью по напряжению

$$K_{o.c} = K / (1 + K\beta_{o.c}), \quad (1)$$

где K — коэффициент усиления без обратной связи; $\beta_{o.c}$ — коэффициент обратной связи, который для данной схемы можно записать следующим образом:

$$\beta_{o.c} = R3 / (R3 + R6), \quad (2)$$

т. е. это коэффициент передачи напряжения делителя на этих резисторах.

Произведение $K\beta_{o.c}$, называемое глубиной обратной связи, определяет коэффициент передачи напряжения от входа усилителя до выхода цепи обратной связи. Как показывает теоретический анализ усилителей, при введении отрицательной обратной связи с глубиной $K\beta_{o.c}$, коэффициенты искажений снижаются в $(1 + K\beta_{o.c})$ раз, входное сопротивление усилителя увеличивается, а выходное уменьшается в $(1 + K\beta_{o.c})$ раз, расширяется полоса пропускания усилителя, уменьшаются в $(1 + K\beta_{o.c})$ раз нежелательные относительные изменения коэффициента усиления, вызываемые старением усилительных элементов, изменением напряжения питания и другими причинами. Таким образом, чем больше глубина обратной связи, тем качественнее работа усилителя.

Действительно, пусть $K\beta_{o.c} \gg 1$, тогда из формулы (1) следует, что $K_{o.c} = 1/\beta_{o.c}$. Отсюда коэффициент усиления усилителя с обратной связью определяется только параметрами цепи обратной связи. Так как цепь обратной

связи выполняется обычно на пассивных элементах с высокой стабильностью, коэффициент усиления $K_{o.c}$ будет также стабилен, т. е. он не будет зависеть от частоты, уровня сигналов и др., что и требуется для идеального усилителя. Однако при введении обратной связи снижается коэффициент усиления. Поэтому, чтобы обеспечить необходимое усиление и стабильность, усилитель без обратной связи должен обладать большим коэффициентом усиления.

Пример. Если коэффициент усиления без обратной связи $K=100$, то при глубине обратной связи, равной 10, $K_{o.c}=10$. Если коэффициент усиления без обратной связи $K=1000$, то такой же, как в первом случае, коэффициент усиления с обратной связью $K_{o.c}=10$ получим при глубине обратной связи, равной 100. Таким образом, второй усилитель будет намного стабильней, т. е. при глубине обратной связи, равной 10, он будет иметь в десять раз больший коэффициент усиления $K_{o.c}=100$.

В схеме исследования двухтактного транзисторного усилителя напряжения низкой частоты, показанной на рис. 1, включение цепи обратной связи $C3$, $R6$ производится переключателем $П1$; переключатель $П2$ обеспечивает подключение вольтметра к входу или выходу усилителя. Входное напряжение подается от генератора низкой частоты ГЗ-35. Форму выходного напряжения усилителя контролируют с помощью осциллографа.

Оборудование и аппаратура

Генератор низкой частоты ГЗ-35 с диапазоном частот от 20 до 20 000 Гц и выходным напряжением от 0 до 8 В при нагрузке 600 Ом	1 шт.
Электронный осциллограф С1-49	1 »
Стабилизатор напряжения постоянного тока Б5-7 с выходным напряжением 12 В при нагрузке до 20 мА	1 »
Ламповый вольтметр с измерением переменного напряжения ВК7-9	1 »
Транзисторы: $T1-T3$ (МП40)	3 »
Резисторы: $R1$ (МЛТ-0,5-12 кОм $\pm 5\%$)	1 »
$R2$ (МЛТ-0,5-36 кОм $\pm 5\%$)	1 »
$R3$ (УЛИ-0,125-30 Ом $\pm 5\%$)	1 »
$R4$ (МЛТ-0,5-1,5 кОм $\pm 5\%$)	1 »
$R5$ (МЛТ-0,5-100 Ом $\pm 5\%$)	1 »
$R6$ (МЛТ-0,5-270 Ом $\pm 5\%$)	1 »
Конденсаторы: $C1$ (К53-4-25-3,0 мкФ)	1 »
$C2$ (К50-6-25-20,0 мкФ)	1 »
$C3$ (К50-6-25-10,0 мкФ)	1 »
$C4$ и $C5$ (ВМ-2-160-0,015 мкФ)	2 »

Тумблеры <i>П1</i> и <i>П2</i> (ТВ-2-1)	2 шт.
Трансформаторы: <i>Тр1</i> (ТС-74)	1 »
<i>Тр2</i> (ТВ-285)	1 »
Громкоговоритель 0,1ГД-6 ($r_{\text{катуш.}} = 10 \text{ Ом}$)	1 »

Порядок выполнения работы

1. Подключить к схеме для исследования двухтактно-го усилителя мощности (см. рис. 1) вольтметр, генератор низкочастотных сигналов и источник питания, установив на его выходе напряжение 10 В.

2. Снять амплитудную характеристику усилителя без обратной связи. Результаты измерений записать в табл. 1. По данным табл. 1 подсчитать значения коэффициентов усиления и занести их в эту же таблицу. Интервалы изменения входных и выходных напряжений должны быть примерно одинаковы и таковы, чтобы их количество составляло 8—12 во всем диапазоне.

Таблица 1. Амплитудная характеристика двухтактного усилителя без обратной связи

$U_{\text{вх}}, \text{ В}$	
$U_{\text{вых}}, \text{ В}$	
K_U	

3. Снять частотную характеристику усилителя без обратной связи. Результаты измерений и расчетов занести в табл. 2.

Таблица 2. Частотная характеристика усилителя без обратной связи

		$f, \text{ Гц}$	50	100	200	500	1000	5000	10 000	20 000
$U_{\text{вх}} = \dots \text{ В}$	$U_{\text{вых}}, \text{ В}$									
	K_U									

4. Снять амплитудную характеристику усилителя с отрицательной обратной связью по напряжению. Характеристику снимать при включенном переключателе *П1*. Результаты измерений и расчетов занести в табл. 3.

Таблица 3. Амплитудная характеристика усилителя с обратной связью

$U_{вх}, В$	
$U_{вых}, В$	
K_U	

5. Снять частотную характеристику усилителя с отрицательной обратной связью. Результаты измерений и расчетов занести в табл. 4.

Таблица 4. Частотная характеристика усилителя с обратной связью

$U_{вх} = \dots В$	$f, Гц$	50	100	200	500	1000	5000	10 000	20 000
	$U_{вых}, В$								
	K_U								

6. По данным табл. 2 и 4 и формуле (1) определить глубину обратной связи: $K\beta_{o.c}$ и коэффициент обратной связи $\beta_{o.c}$ усилителя на частоте 1000 Гц.

7. Рассчитать по формуле (2) коэффициент обратной связи для заданных параметров схемы и сравнить его значение с найденным экспериментально.

8. По данным табл. 1—4 построить на одном чертеже амплитудные характеристики усилителя с обратной связью и без нее, а на другом — частотные характеристики в полулогарифмическом масштабе (см. работу № 16).

Содержание отчета

1. Наименование отчета.
2. Название и технические данные использованных измерительных приборов.
3. Схема двухтактного усилителя мощности с подключенными измерительными приборами.
4. Табл. 1—4 с результатами измерений при снятии амплитудных и частотных характеристик двухтактного усилителя.
5. Амплитудные и частотные характеристики усилителя с обратной связью и без нее.

Контрольные вопросы

1. Каково исходное состояние транзисторов в двухтактной схеме, работающей в классе В: оба транзистора открыты или оба почти закрыты?
2. В чем преимущество схемы, работающей в классе В, по сравнению со схемой, работающей в классе А?
3. Что называется коэффициентом обратной связи по напряжению, а что глубиной обратной связи?
4. Чему равен коэффициент усиления усилителя с большим коэффициентом усиления без обратной связи при наличии глубокой отрицательной обратной связи: коэффициенту усиления без обратной связи, коэффициенту обратной связи, обратной величине коэффициента обратной связи или глубине обратной связи?

Работа № 18. ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО УСИЛИТЕЛЯ

Цель работы — ознакомиться с методом и схемой коррекции частотной характеристики импульсного усилителя.

Пояснения. Усиление широкополосных импульсных сигналов осуществляется обычно усилителями с резистивно-емкостными связями, обладающими наиболее равномерной частотной характеристикой. Простейшая схема одного каскада импульсного усилителя и его частотная характеристика показаны на рис. 1, а и б. Как видно из рис. 1, б, равномерное усиление сигнала производится в ограниченной полосе частот: от нижней границы f_n до верхней f_v . Значения f_n и f_v определяются на уровне $0,7 K_{ус}$, где $K_{ус}$ — коэффициент усиления в зоне средних частот. Другими словами, указанным частотам соответствует уменьшение коэффициента усиления в $\sqrt{2}$ раз или уменьшение на 3 дБ.

Оценка свойств усилителя, предназначенного для усиления импульсов произвольной формы, производится по его реакции на прямоугольный импульс. На рис. 1, в и г показаны импульсы прямоугольной формы, приложенный к входу усилителя, и искаженный импульс на выходных зажимах. Фронт выходного импульса в отличие от входного имеет конечную длительность τ_y , называемую временем установления, которое определяется характеристиками усилительных каскадов на высоких частотах. Чем больше верхняя граничная частота f_B (см. рис. 1, б), тем меньше τ_y . В свою очередь, граничная частота зависит

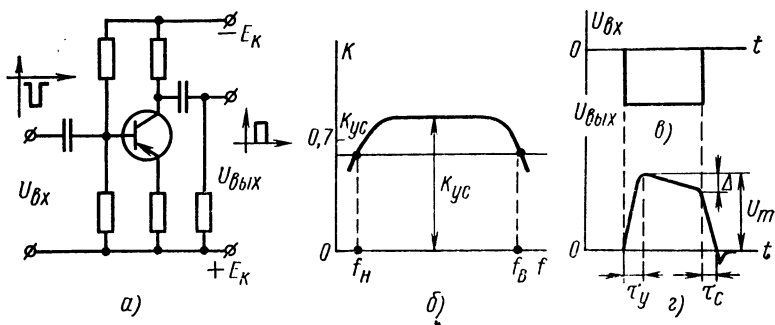


Рис. 1. Импульсный усилитель:

а — схема, б — частотная характеристика, в и г — входной и выходной импульсы

от частотных свойств транзистора. Поэтому для импульсных усилителей применяют высокочастотные транзисторы. Кроме того, для уменьшения τ_y используют методы высокочастотной коррекции.

Спад плоской вершины импульса Δ (см. рис. 1, г) обусловлен снижением коэффициента усиления на низких частотах. Чем меньше нижняя граничная частота, тем меньше Δ . В свою очередь, частота f_n (см. рис. 1, б) зависит от емкостей разделительных и блокирующих конденсаторов. Поэтому в импульсных усилителях эти емкости имеют большие значения, чем в усилителях гармонических сигналов. Кроме этой меры для уменьшения спада вершины в импульсных усилителях применяют специальную коррекцию частотной характеристики. Принцип коррекции, или метод уменьшения спада вершины, заключается в том, что схемным путем уменьшают частоту f_n ; при

этом, однако, уменьшается коэффициент усиления в зоне средних частот.

Импульсный усилительный каскад с низкочастотной коррекцией, подлежащий исследованию, показан на рис. 2, а. Отличие этой схемы от простейшей, показанной на рис. 1, а, заключается в том, что коллекторная нагрузка состоит из двух последовательно включенных резисторов R_K' и R_K'' , к месту соединения которых подключен конденсатор C_K . На средних частотах, в связи с тем что емкостное сопротивление C_K выбирается много меньше

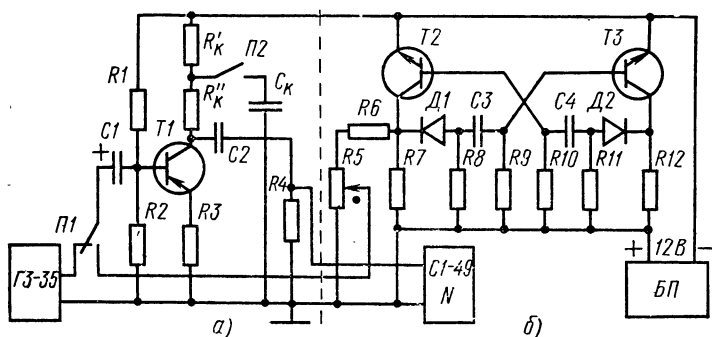


Рис. 2. Импульсный усилительный каскад с низкочастотной коррекцией (а) и генератор прямоугольных импульсов (б)

R_K' , коэффициент усиления каскада, зависящий от сопротивления в коллекторной цепи, будет определяться только сопротивлением R_K'' . На нижних частотах коэффициент усиления, с одной стороны, уменьшается за счет увеличения емкостных сопротивлений конденсаторов $C1$ и $C2$, а, с другой стороны, увеличивается за счет роста емкостного сопротивления C_K . Таким образом, емкость конденсатора C_K должна выбираться с таким расчетом, чтобы компенсировать уменьшение коэффициента усиления за счет суммарного влияния емкостей $C2$ и $C1$.

Пусть на вход исследуемого каскада без коррекции (конденсатор C_K отключен) поступает положительный импульс. Транзистор начинает закрываться и на нагрузке формируется передний фронт выходного импульса. Исходные напряжения на конденсаторах $C1$ и $C2$ за это время практически не изменяются. С началом формирования плоской вершины начинают изменяться напряжения на конденсаторах так, что выходное напряжение —

амплитуда импульса — уменьшается. Результирующий спад плоской вершины можно определить формулой

$$\Delta/U_m \approx t_n/\tau_s, \quad (1)$$

где U_m — амплитуда выходного импульса; t_n — длительность импульса; τ_s — условная эквивалентная постоянная времени обеих разделительных цепочек, которая связана со значением нижней граничной частоты следующей формулой:

$$\tau_s \approx 1/2\pi f_n. \quad (2)$$

Если импульс поступает на вход каскада с коррекцией, уменьшение амплитуды выходного импульса из-за влияния емкостей конденсаторов $C1$ и $C2$ компенсируется ростом напряжения на конденсаторе C_k . Спад плоской вершины уменьшается. Следовательно, в каскаде с коррекцией должна уменьшиться нижняя граничная частота.

Срез (задний фронт) выходного импульса, так же как и передний, имеет конечную длительность τ_s , называемую временем спада импульса. Время спада, как и время установления, определяется характеристикой каскада на высоких частотах. Для уменьшения τ_s также следует выбирать высокочастотные транзисторы для усилителя и применять методы высокочастотной коррекции.

В схеме импульсного усилительного каскада с низкочастотной коррекцией, подлежащего исследованию (см. рис. 2, а), включение корректирующей емкости C_k производится переключателем $П2$. Подача на вход каскада прямоугольных импульсов от генератора, показанного на рис. 2, б, осуществляется через переключатель $П1$, который в другом положении подключает к входу усилителя генератор синусоидальных напряжений ГЗ-35.

Оборудование и аппаратура

Генератор низкой частоты ГЗ-35 с диапазоном частот от 20 до 20 000 Гц и выходным напряжением от 0 до 8 В при нагрузке 600 Ом	1 шт.
Электронный осциллограф с открытым входом с измерением амплитуд сигналов от 20 мВ до 120 В (С1-49)	1 »
Стабилизатор напряжения постоянного тока Б5-7 с выходным напряжением 12 В при нагрузке до 30 мА	1 »
Конденсаторы: $C1$ (К50-6-25-10 мкФ)	1 »
$C2$ (МБМ-160-0,05 мкФ)	1 »
C_k (МБМ-160-0,5 мкФ)	1 »
$C3$ и $C4$ (БМ-2-160-0,05 мкФ)	2 »

Транзисторы: $T1$ (МП21Е)	1 шт.
$T2$ и $T3$ (МП37Б)	2 »
Полупроводниковые диоды $D1$ и $D2$ (Д9Д)	2 »
Резисторы: $R1, R6$ (МЛТ-0,5-10 кОм $\pm 5\%$)	2 »
$R2$ (МЛТ-0,5-1,5 кОм $\pm 5\%$)	1 »
$R3$ (МЛТ-0,5-510 Ом $\pm 5\%$)	1 »
$R_{к'}$ и $R_{к''}$ (МЛТ-0,5-1,0 кОм $\pm 5\%$)	2 »
$R4, R9$ и $R10$ (МЛТ-0,5-15 кОм $\pm 5\%$)	3 »
$R5$ (СП-11-А2-1,0 кОм)	1 »
$R7, R8, R11$ и $R12$ (МЛТ-0,5-2,0 кОм $\pm 5\%$)	4 »
Тумблеры $P1$ и $P2$ (ТВ-2-1)	2 »

Порядок выполнения работы

1. Подключить к исследуемому импульсному усилителю (см. рис. 2, *а*) измерительную аппаратуру и источник питания, установив на нем напряжение 12 В.

2. Определить для заданной длительности входных импульсов относительный спад плоской вершины выходного импульса; вычислить по результатам измерений значение нижней граничной частоты и сравнить его со значением, найденным экспериментально. Для чего необходимо отключить переключателем $P2$ корректирующую емкость C_k и подать на вход каскада от генератора прямоугольных импульсов выходное напряжение, поставив в нужное положение переключатель $P1$. Установить амплитуду выходных импульсов 1 В, регулируя ее потенциометром $R5$ и измеряя осциллографом. Измерить с помощью осциллографа спад Δ плоской вершины выходного импульса и длительность $t_{и}$ входного (она равна примерно 100 мкс); определить по формуле (1) эквивалентную постоянную времени τ_0 каскада без коррекции и вычислить по формуле (2) нижнюю граничную частоту f_n его.

3. Определить экспериментально нижнюю граничную частоту каскада без коррекции. Для чего необходимо подключать вход каскада к генератору синусоидальных колебаний низкой частоты; установить на выходе каскада амплитуду напряжения в 1 В с частотой 20 кГц. Уменьшая частоту генератора и сохраняя неизменным напряжение на входе, определить нижнюю граничную частоту $f_{н.эксп}$ каскада, соответствующую уменьшению амплитуды выходного напряжения до 0,7 В.

4. Определить для заданной длительности спад Δ плоской вершины импульса, эквивалентную постоянную времени τ_0 и нижнюю граничную частоту $f_{н.корр}$ каскада

с коррекцией. Определить экспериментально нижнюю граничную частоту $f_{н.корр.экс}$ каскада с коррекцией. Порядок выполнения операций указан в пп. 2 и 3 задания, но конденсатор C_K подключают к каскаду.

Содержание отчета

1. Наименование отчета.
2. Названия и технические данные использованных измерительных приборов.
3. Схема исследованного импульсного усилителя и генератора прямоугольного напряжения.
4. Расчетные и экспериментально определенные параметры импульсного усилителя с коррекцией и без нее (Δ , τ_a , f_n).

Контрольные вопросы

1. На каком уровне частотной характеристики усилителя определяются верхняя и нижняя граничные частоты?
2. Как связаны время установления импульса и верхняя граничная частота: чем больше частота, тем меньше или больше время установления?
3. Влиянием каких емкостей обусловлен спад плоской вершины импульса в резистивно-емкостном каскаде?
4. Объясните принцип действия низкочастотной коррекции.

Работа № 19. ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗБИРАТЕЛЬНОГО РЕЗИСТИВНОГО УСИЛИТЕЛЯ С ДВОЙНЫМ Т-ОБРАЗНЫМ МОСТОМ *

Цель работы — ознакомиться с принципом построения и основными параметрами избирательного усилителя, имеющего отрицательную частотно-зависимую обратную связь.

Пояснения. В отличие от усилителей с широкой полосой частот избирательные усилители предназначены для усиления колебаний в узкой полосе частот и используются там, где требуется выделить полезный (несущий информацию) сигнал определенной частоты, или с узкой полосой частот, на который воздействуют помехи, имеющие широкий спектр. Из частотной характеристики, пока-

* Принцип построения схемы и методика проведения работы заимствованы из книги Мелешкиной Л. П. и др. «Руководство к лабораторным работам по основам промышленной электроники». М., «Высшая школа», 1967.

занной на рис. 1, видно, что избирательный усилитель имеет максимальный коэффициент усиления $K_{\text{макс}}$ на определенной частоте f_0 , называемой избираемой частотой.

Основным параметром, характеризующим частотную характеристику избирательного усилителя и показывающим; как быстро уменьшается коэффициент усиления с отклонением частоты входного сигнала от f_0 , является добротность

$$Q = f_0 / 2\Delta f, \quad (1)$$

где $2\Delta f$ — полоса частот, в которой коэффициент усиления $K \geq K_{\text{макс}}/\sqrt{2}$ (см. рис. 1, на котором показан графический способ определения полосы частот $2\Delta f$).

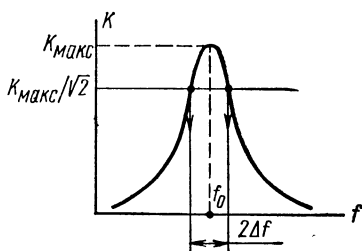


Рис. 1. Частотная характеристика избирательного усилителя

Принцип построения избирательного усилителя состоит в том, что обычный низкочастотный или широкополосный усилитель с большим коэффициентом усиления K охватывают отрицательной обратной связью, коэффициент передачи которой $\beta_{0.c}$ зависит от частоты и имеет минимальное значение на избираемой частоте f_0 .

На частотах, отличных от f_0 , коэффициент $\beta_{0.c}$ увеличивается, возрастает отрицательная обратная связь и коэффициент усиления усилителя уменьшается, чем обеспечивается избирательность усилителя. Очевидно, что выходное напряжение цепи обратной связи на частотах, отличных от f_0 , должно находиться в противофазе с входным напряжением, что является необходимым условием возникновения отрицательной обратной связи

В качестве звена обратной связи в избирательных усилителях часто используют резистивно-емкостной двойной Т-образный мост (рис. 2, а), амплитудная и фазовая частотные характеристики которого показаны на рис. 2, б и в. Как видно из рис. 2, б и в, этот мост отвечает требованиям, предъявляемым к звену обратной связи избирательного усилителя. На определенной частоте f_0 (на рис. 2, б и в по оси абсцисс даны относительные частоты)

коэффициент передачи β_T напряжения моста равен нулю, т. е. минимален. При частотах, достаточно сильно отличающихся от f_0 , фаза φ_T выходного напряжения стремится к фазе входного напряжения.

Таким образом, для частот, больших и меньших f_0 , можно выполнить условие возникновения отрицательной обратной связи в усилителе, т. е. включить Т-образный мост, чтобы его выходное напряжение при частотах $f \neq f_0$ имело составляющую в противофазе с входным напряжением усилителя. В ином случае, если бы фазы выходных

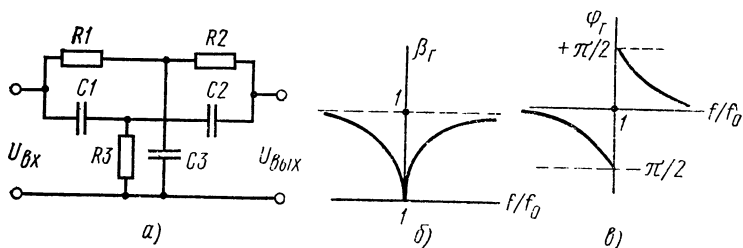


Рис. 2. Двойной Т-образный мост:

а — схема, б — амплитудно-частотная характеристика, в — фазо-частотная характеристика

напряжений моста на частотах, больших (в достаточной мере) и меньших f_0 , были противоположны (см. пунктирные линии на рис. 2, в), выполнение условия отрицательной обратной связи для частот, больших f_0 , приводило бы к выполнению условия положительной обратной связи на частотах, меньших f_0 .

Наиболее часто применяемые соотношения между параметрами моста следующие:

$$R_1 = R_2 = 2R_3 = R; \quad C_1 = C_2 = C_3/2 = C. \quad (2)$$

При этом $\beta_T(f_0) = 0$,
когда

$$f_0 = 1/2\pi RC. \quad (3)$$

Схема избирательного усилителя с двойным Т-образным мостом, подлежащая исследованию, показана на рис. 3. Усилитель собран на транзисторах $T1$ и $T3$. Выходное напряжение моста подается через переключатель Π , замыкающий цепь отрицательной обратной связи, на

эмиттерный повторитель — транзистор T_2 , который имеет достаточно большое сопротивление, уменьшающее шунтирование моста.

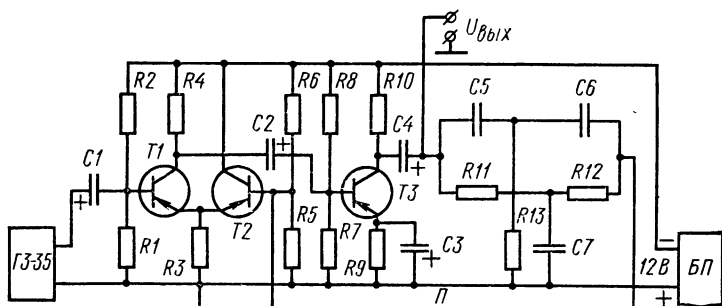


Рис. 3. Схема избирательного усилителя с двойным Т-образным мостом

Оборудование и аппаратура

Генератор низкой частоты ГЗ-35 с диапазоном частот от 20 до 20 000 Гц и выходным напряжением от 0 до 8 В при нагрузке 600 Ом	1 шт.
Электронный осциллограф С1-49 с измерением амплитуд сигналов от 20 мВ до 120 В и полосой частот от 0 до 5 МГц	1 »
Стабилизатор напряжения постоянного тока Б5-7 с выходным напряжением 12 В при нагрузке до 30 мА	1 »
Транзисторы $T1-T3$ (МП40)	3 »
Конденсаторы: $C1, C2$ и $C4$ (К50-6-25-10,0 мкФ)	3 »
$C3$ (К50-6-25-50,0 мкФ)	1 »
$C5, C6$ (БМ2-160-0,025 мкФ)	1 »
$C7$ (МБМ-160-0,05 мкФ)	1 »
Резисторы: $R1$ (МЛТ-0,5-9,1 кОм $\pm 5\%$)	1 »
$R2$ (МЛТ-0,5-56 кОм $\pm 5\%$)	1 »
$R3, R9, R10, R13$ (МЛТ-0,5-1,1 кОм $\pm 5\%$)	4 »
$R4, R5$ (МЛТ-0,5-3,9 кОм $\pm 5\%$)	2 »
$R6$ (МЛТ-0,5-15 кОм $\pm 5\%$)	1 »
$R7$ (МЛТ-0,5-3,0 кОм $\pm 5\%$)	1 »
$R8$ (МЛТ-0,5-7,5 кОм $\pm 5\%$)	1 »
$R11$ и $R12$ (МЛТ-0,5-2,0 кОм $\pm 5\%$)	2 »
Тумблер Π (ТВ-2-1)	1 »

Порядок выполнения работы

1. Подключить измерительную аппаратуру к исследуемому избирательному усилителю. Установить на выходе блока питания напряжение 12 В.

2. Рассчитать по формулам (2) и (3) и известным параметрам схемы избираемую частоту f_0 усилителя.

3. Снять частотную характеристику избирательного усилителя, занося результаты измерений в табл. 1. Перед снятием частотной характеристики разомкнуть переключателем Π цепь обратной связи и установить амплитуду выходного напряжения усилителя 1 В на частоте 5 кГц. Замкнуть переключатель и снять частотную характеристику. Интервалы изменения частоты выбирать так, чтобы можно было детально проследить ход кривой частотной характеристики, особенно на участке ее максимума.

Таблица 1. Частотная характеристика усилителя с обратной связью

$U_{вх} = \dots \text{ В}$	$U_{вых}, \text{ В}$										
	$f, \text{ Гц}$	100	...	...	...	...	...	...	...	...	20 000
	K_U										

4. Снять частотную характеристику усилителя без обратной связи, занося результаты измерений в табл. 2.

Таблица 2. Частотная характеристика усилителя без обратной связи

$U_{вх} = \dots \text{ В}$	$U_{вых}, \text{ В}$							
	$f, \text{ Гц}$	100	200	500	1000	5000	10 000	20 000
	K_U							

5. По данным табл. 1 и 2 построить на одном чертеже частотные характеристики усилителя с обратной связью и определить по ним значение избираемой частоты f_0 , а также добротность усилителя Q .

Содержание отчета

1. Наименование отчета.
2. Название и технические данные использованных измерительных приборов.
3. Схема исследуемого избирательного усилителя.
4. Расчетные и экспериментально определенные параметры f_0 и Q усилителя.
5. Табл. 1 и 2 с результатами измерений при снятии частотных характеристик усилителя с обратной связью и без нее.
6. Частотные характеристики усилителя.

Контрольные вопросы

1. Что называется добротностью избирательного усилителя?
2. Каким коэффициентом передачи — минимальным или максимальным должно обладать звено отрицательной обратной связи в избирательном усилителе на избираемой частоте?
3. Где применяют избирательные усилители?
4. Каков принцип действия усилителя с обратной связью на двойном Т-образном мосте?

Работа № 20. ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы — ознакомиться с принципом построения и основными параметрами балансного эмиттерного повторителя напряжения постоянного тока на составных транзисторах.

Пояснения. Комбинация из двух и более транзисторов, имеющая три основных внешних вывода (эквивалентных базе, эмиттеру и коллектору обычного транзистора) и высокий коэффициент усиления по току, называется составным транзистором. Две наиболее часто встречающиеся схемы составного транзистора прямой проводимости показаны на рис. 1, а и б. Причем на рис. 1, а показана схема составного транзистора на транзисторах одной проводимости ($p-n-p$ -типа), а на рис. 1, б — разной проводимости ($p-n-p$ и $n-p-n$ -типа). Обе схемы имеют коэффициент усиления базового тока

$$\beta_{\text{сост}} = \beta_1 \beta_2, \quad (1)$$

где β_1 и β_2 — соответственно коэффициенты усиления транзисторов $T1$ и $T2$, так как базовый ток второго транзистора есть эмиттерный (или коллекторный) ток первого

транзистора. Так, при минимальном значении коэффициента усиления каждого транзистора 20, коэффициент усиления по току составного транзистора будет не менее 400.

Схема составного транзистора, показанная на рис. 1, б, имеет меньшее прямое напряжение $U_{б.э.}$, чем схема, показанная на рис. 1, а. Прямое напряжение на переходе зависит от температуры перехода, которая в свою очередь зависит от мощности, рассеиваемой транзистором, и температуры окружающей среды. Отсюда напряжение $U_{б.э.}$ будет зависеть от режима составного транзистора. Так как напряжение $U_{б.э.}$ составного транзистора (см. рис. 1, б) определяется прямым напряжением на переходе база — эмиттер только транзистора $T1$ и ток через него в β_2 раз меньше тока через транзистор $T2$, то и рассеиваемая на нем мощность также будет меньше, чем на транзисторе $T2$, и, следовательно, напряжение $U_{б.э.}$ в этом случае будет меньше, зависить от изменения тока, т. е. будет стабильнее, что и требуется для таких усилителей.

Схема усилителя мощности постоянного тока на балансном эмиттерном повторителе с составными транзисторами показана на рис. 2. Резисторы $R1, R2, R3$ и $R4, R5, R6$ служат для задания режима покоя транзисторов. Входное напряжение подается на базы транзисторов $T1$ и $T4$, а выходное снимается с резисторов $R3$ и $R6$ и поступает на сопротивление нагрузки R_H' или R_H'' .

В исходном состоянии напряжения на резисторах $R3$ и $R6$ одинаковы, а выходное напряжение равно нулю с точностью до небольшого напряжения разбаланса, которое обычно стремятся ликвидировать, балансируя схему при настройке. Если входное напряжение имеет полярность, указанную на рис. 2, транзисторы $T1$ и $T2$ начинают закрываться, а $T3$ и $T4$ приоткрываются. Напряжение на резисторе $R6$ растет по абсолютной величине, а на резисторе $R3$ падает и на выходе усилителя возникает напряжение, полярность которого указана на рис. 2. Ко-

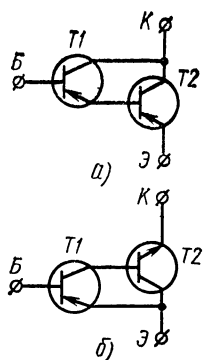


Рис. 1. Схемы составных транзисторов прямой проводимости:

а — на транзисторах одной проводимости,
б — на транзисторах разной проводимости

эффицент усиления по напряжению близок к единице; схема производит усиление только по току и мощности.

Так как коэффициент передачи по току составного транзистора определяется формулой (1) и он не менее 400, входное сопротивление усилителя определяется только сопротивлениями резисторов базовых цепей, так как пересчитанные к входу сопротивления эмиттерных цепей $\beta_1\beta_2R_3$ ($\beta_3\beta_4R_6$) и сопротивление нагрузки $\beta_1\beta_2R_H$

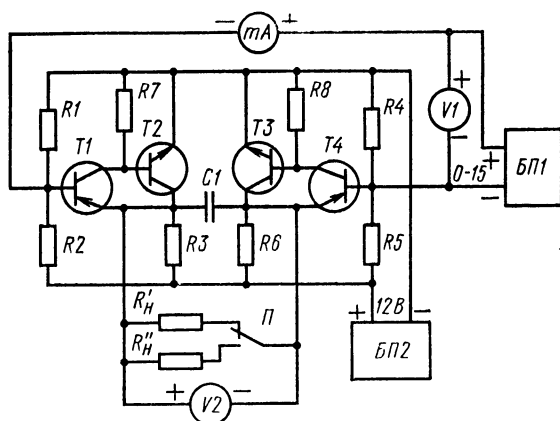


Рис. 2. Схема усилителя мощности постоянного тока на балансном эмиттерном повторителе с составными транзисторами

много больше сопротивления $R1 \parallel R2$. Отсюда, учитывая, что по переменному току (или по приращениям напряжений) сопротивление блока питания БП2 равно нулю, получим

$$R_{\text{вх}} = R1 \parallel R2 + R4 \parallel R5. \quad (2)$$

По этой же причине (высокий коэффициент передачи тока) на выходном сопротивлении усилителя практически не сказываются сопротивления базовых делителей и внутреннее сопротивление источника входного напряжения. Поэтому выходное сопротивление усилителя мало (единицы или десятки ом).

Максимальная амплитуда выходного напряжения усилителя, определяющая номинальную выходную мощность, зависит от напряжения источника питания, сопротивлений эмиттерных резисторов R_3 (R_6) и нагрузки,

а также напряжения покоя на резисторах в цепи эмиттера. При симметричной схеме и условии, что напряжения покоя $U_{э0}$ на эмиттерах транзисторов относительно плюсовой шины питания $U_{э0} = E_k/2$, максимальная амплитуда выходного напряжения

$$U_{\text{вых. макс}} = E_k \frac{R_n}{R_n + 2R_3}, \quad (3)$$

где $R_3 = R3 = R6$.

Полоса пропускания схемы, как любого усилителя постоянного тока, начинается с нулевой частоты.

Оборудование и аппаратура

Вольтметр $V1$ постоянного тока с пределом измерения 15 В (М330 или прибор Ц4311)	1 шт.
Микроамперметр постоянного тока с пределом измерения 500 мкА (М330 или прибор Ц4311)	1 »
Вольтметр $V2$ постоянного тока класса 0,1 и пределом измерений 15 В (ампервольтметр Р386)	1 »
Стабилизатор напряжения постоянного тока с выходным напряжением 12 В при токе до 100 мА (Б5-7)	1 »
Стабилизатор напряжения постоянного тока с регулировкой выходного напряжения от 0 до 15 В при токе до 3 мА (Б5-7)	1 »
Транзисторы: $T1$ и $T4$ (МП114)	2 »
$T2$ и $T3$ (КТ602Б)	2 »
Резисторы: $R1, R2, R4, R5$ (МЛТ-0,5-18 кОм $\pm 5\%$)	4 »
$R3, R6$ (МЛТ-0,5-3 кОм $\pm 5\%$)	2 »
$R7, R8$ (МЛТ-0,5-51 кОм $\pm 5\%$)	2 »
R_n (МЛТ-0,5-6,2 кОм $\pm 5\%$)	1 »
R_n'' (МЛТ-0,5-3 кОм $\pm 5\%$)	1 »
Конденсатор $C1$ (МБМ-160-2200 пФ $\pm 10\%$)	1 »

Порядок выполнения работы

1. Подключить к исследуемой схеме (см. рис. 2) измерительную аппаратуру и стабилизаторы напряжения. Один стабилизатор подключают к входу усилителя и он служит источником входного напряжения. Другой стабилизатор служит источником питания для схемы. Установить на выходе стабилизатора, служащего источником питания, напряжение 12 В. Цифровой ампервольтметр предназначен для измерения напряжения на выходе усилителя.

2. Определить расчетным путем по известным параметрам схемы и экспериментально входное сопротивление усилителя $R_{\text{вх. расч}}$ и $R_{\text{вх. эксп.}}$.

3. Измерить поочередно вольтметром $V2$ напряжение покоя на эмиттерных сопротивлениях $R3$ и $R6$ относительно плюсовой шины питания. Записать полученные значения напряжений U_{R3} и U_{R6} , определить напряжение разбаланса $U_{\text{раз}} = U_{R3} - U_{R6}$ и сравнить его с напряжением $U'_{\text{раз}}$, непосредственно измеренным между эмиттерами составных транзисторов цифровым вольтметром.

4. Определить расчетным путем по известным параметрам схемы максимальное выходное напряжение $U_{\text{вых.макс}}$ усилителя для обоих нагрузочных сопротивлений, считая, что напряжения покоя U_{R3} и U_{R6} равны половине напряжения питания.

5. Снять амплитудные характеристики усилителя в полном диапазоне входных напряжений для обоих нагрузочных сопротивлений, занося показания в таблицу (интервалы изменения входного напряжения должны быть 1 В). По данным таблицы построить на миллиметровке амплитудные характеристики усилителя. При снятии характеристик определить экспериментально максимальные выходные напряжения $U_{\text{вых.макс}}$ для обоих нагрузочных сопротивлений.

Т а б л и ц а. Амплитудная характеристика балансного эмиттерного повторителя

$R'_H = 3 \text{ кОм}$	$U_{\text{вх}}, \text{ В}$						
	$U_{\text{вых}}, \text{ В}$						
$R''_H = 6,2 \text{ кОм}$	$U_{\text{вх}}, \text{ В}$						
	$U_{\text{вых}}, \text{ В}$						

6. Рассчитать коэффициенты усиления по мощности для обоих нагрузочных сопротивлений. Коэффициент мощности $K_p = P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}}$ определяется по формуле

$$K_p = \frac{U_{\text{вых}}^2 / R_H}{U_{\text{вх}}^2 / R_{\text{вх}}}.$$

Значение входного сопротивления считать равным экспериментальному значению.

7. По известным максимальным выходным напряжениям рассчитать номинальную выходную мощность $P_{ном}$ для обоих нагрузочных сопротивлений.

8. Определить выходное сопротивление $R_{вых}$ усилителя. Выходное сопротивление определяется как отношение приращения выходного напряжения при переключении сопротивления нагрузки (от значения 3 кОм к значению 6,2 кОм) к разности токов, соответствующих этим нагрузочным сопротивлениям.

Содержание отчета

1. Наименование отчета.
2. Название и технические данные измерительных приборов, необходимых для выполнения работы.
3. Схема исследуемого усилителя с подключенными для измерения приборами.
4. Формулы, использованные в работе, и значения расчетных и экспериментально определенных параметров.
5. Таблица со снятыми характеристиками.
6. Амплитудная характеристика.

Контрольные вопросы

1. Что называется составным транзистором?
2. Каким из двух соотношений будет определяться коэффициент усиления базового тока для составного транзистора, состоящего из трех обычных транзисторов: $\beta_1 + \beta_2 + \beta_3$ или $\beta_1 \beta_2 \beta_3$?
3. Какой балансный эмиттерный повторитель будет иметь большее входное сопротивление: на двух обычных транзисторах или на двух составных транзисторах?
4. Какой балансный повторитель будет работать стабильнее: на составном транзисторе, показанном на рис. 1, б или на рис. 1, а?
5. Почему схема балансного повторителя не производит усиления по напряжению?

Глава пятая ГЕНЕРАТОРЫ

Работа № 21. ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА СИНУСОИДАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА RC-ЦЕПЯХ *

Цель работы — ознакомиться с принципом построения генераторов синусоидального напряжения на

* Методика проведения работы и схема генератора заимствованы из книги Мелешкиной Л. П. и др.

основе транзисторного усилителя низкой частоты, охваченного положительной обратной связью на RC -цепи.

Пояснения. Обычный низкочастотный усилитель, охваченный положительной обратной связью, при определенных условиях может служить генератором переменного напряжения. Такая возможность появляется при возбуждении усилителя, которое характеризуется появлением на его выходе устойчивых колебаний в виде периодически изменяющегося напряжения; входной сигнал при этом отсутствует. Для выполнения условия самовозбуждения усилителя необходимо, чтобы

$$K\beta_{o.c} \geq 1; \quad (1)$$

$$\varphi_{yc} + \varphi_{o.c} = 2\pi n, \quad (2)$$

где K — коэффициент усиления усилителя; $\beta_{o.c}$ — коэффициент положительной обратной связи; φ_{yc} — сдвиг фазы напряжения усилителем; $\varphi_{o.c}$ — сдвиг фазы напряжения в цепи обратной связи; $n = 0, 1, 2, \dots$

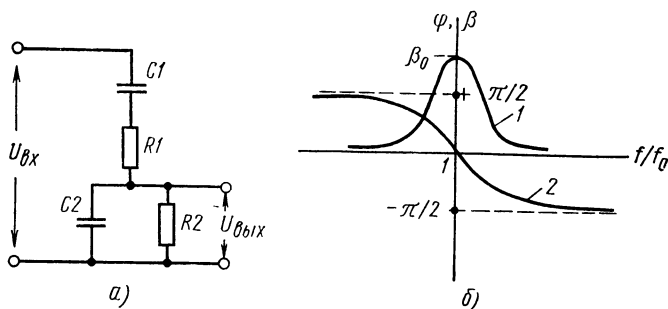


Рис. 1. RC -цепь:

a — схема, b — амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики

Равенство (1) называется условием баланса амплитуд и показывает, что при самовозбуждении сигнал на выходе звена обратной связи должен быть не меньше сигнала на входе усилителя. Равенство (2) называется условием баланса фаз и показывает, что фаза входного напряжения усилителя должна совпадать с фазой выходного напряжения звена обратной связи.

В качестве звена обратной связи для низкочастотных генераторов используют разного вида RC -цепи, одна из которых с ее амплитудно- (1) и фазо-частотными (2) ха-

рактеристиками показана на рис. 1, а и б. Как видно из рис. 1, б, эта цепь обладает избирательными свойствами, т. е. на определенной частоте f_0 она имеет максимальный коэффициент передачи напряжения β_0 ; на этой же частоте сдвиг фаз между выходным и входным напряжениями равен нулю. Наличие максимума коэффициента передачи подтверждается следующими соображениями: на низкой частоте емкостное сопротивление конденсатора $C1$ много больше сопротивлений резисторов $R1$ и $R2$ и выходное

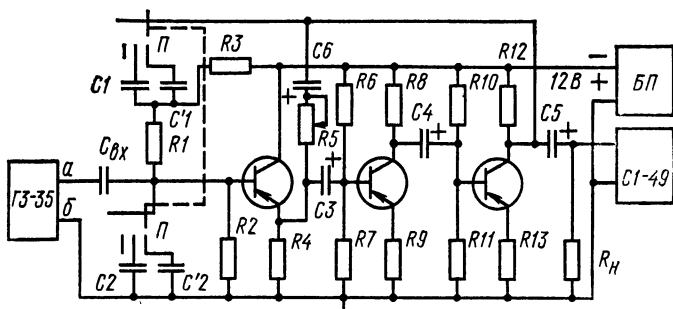


Рис. 2. Схема генератора синусоидального напряжения

напряжение цепи равно нулю; с ростом частоты емкостное сопротивление $C1$ падает и на выходе цепи появляется напряжение; на очень высокой частоте емкостное сопротивление конденсатора $C2$ шунтирует резистор $R2$ и выходное напряжение опять мало. При условиях $R1 = R2 = R$ и $C1 = C2 = C$

$$f_0 = 1/2\pi RC \text{ и } \beta_0 = \frac{1}{3}.$$

Схема генератора синусоидального напряжения с использованием рассмотренной RC -цепи, показанная на рис. 2, выполнена на основе резистивного усилителя низкой частоты на транзисторах $T1$, $T2$ и $T3$. Для стабилизации коэффициента усиления и обеспечения возможности срыва колебаний введена цепь отрицательной обратной связи $C6$, $R5$ с регулируемым коэффициентом передачи за счет изменения сопротивления резистора $R5$. Очевидно, что частота f_r работы генератора будет соответствовать частоте f_0 RC -цепи, включенной в качестве звена положительной обратной связи $C1$, $C2$, $R1$, $R2$. Изменяется частота генератора переключением конденсаторов.

Оборудование и аппаратура

Электронный осциллограф С1-49 с измерением амплитуд сигналов от 20 мВ до 120 В и полосой частот от 0 до 5 МГц	1 шт.
Генератор низкой частоты ГЗ-35 с диапазоном частот от 20 Гц до 200 кГц и амплитудой выходного напряжения до 10 В на нагрузке 600 Ом	1 »
Стабилизатор напряжения постоянного тока Б5-7 с выходным напряжением 12 В при токе нагрузки до 30 мА	1 »
Транзисторы: $T1$, $T2$ и $T3$ (МП41)	3 »
Резисторы: $R1$, $R2$, $R9$, $R12$ (МЛТ-0,5-2,2 кОм \pm 5%)	4 »
$R4$, $R7$, $R8$ и $R11$ (МЛТ-0,5-3,6 кОм \pm 5%)	4 »
$R6$, $R10$ и R_{π} (МЛТ-0,5-16 кОм \pm 5%)	3 »
$R3$ (МЛТ-0,5-9,1 кОм \pm 5%)	1 »
$R5$ (СП-11-А-10 кОм)	1 »
$R13$ (МЛТ-0,5-360 Ом \pm 5%)	1 »
Конденсаторы: $C_{вх}$, $C3$ — $C6$ (К53-4-15 В-10,0 мкФ)	5 »
$C1$ и $C2$ (МБМ-160-0,1 мкФ \pm 10%)	2 »
$C1'$ и $C2'$ (МБМ-160-0,05 мкФ \pm 10%)	2 »
Галетный переключатель Π	1 »

Порядок выполнения работы

1. Подключить к исследуемой схеме осциллограф и стабилизатор напряжения. Подать на стенд напряжение и включить аппаратуру. Установить на выходе стабилизатора напряжение 12 В. Генератор ГЗ-35 подключают к схеме только при выполнении операций, указанных далее в п. 8.

2. Определить расчетным путем по известным параметрам схемы частоту генерации $f_{г.расч}$ для обоих положений переключателя Π и записать их.

3. Регулируя глубину отрицательной обратной связи в генераторе, установить такое значение сопротивления $R5$, при котором возникает устойчивая генерация при обоих положениях переключателя Π .

4. Определить экспериментально с помощью осциллографа (используя калиброванную развертку) частоту генерации схемы $f_{г.эсп}$ для обоих положений переключателя Π и записать полученные значения. Сравнить полученные данные с расчетными (они могут отличаться на 20—30%).

5. Измерить амплитуду выходного напряжения генератора для обоих положений переключателя и записать полученные значения.

6. Определить номинальную выходную мощность P_n генератора для обоих положений переключателя Π при известном сопротивлении нагрузки.

7. Снять на кальку осциллограммы напряжений генератора для обоих положений переключателя Π при одной и той же чувствительности осциллографа.

8. Определить для обоих положений переключателя Π критический коэффициент усиления $K_{кр}$ схемы, при котором срываются колебания. Для определения критического коэффициента усиления следует изменением сопротивления резистора $R5$ добиться срыва генерации, затем разомкнуть переключателем Π цепь обратной связи и подать на вход усилителя (клеммы a и b) напряжение от генератора ГЗ-35 с частотой, равной частоте генерации схемы. Амплитуда выходного напряжения генератора ГЗ-35 устанавливается такой, чтобы не было заметных искажений в кривой выходного напряжения исследуемой схемы. Измеряют установленные амплитуды входного и выходного напряжений с помощью осциллографа. Генератор ГЗ-35 подключают к схеме только при измерении коэффициента усиления.

Содержание отчета

1. Наименование отчета.
2. Название и технические данные использованных измерительных приборов.
3. Схема исследуемого генератора.
4. Формулы, использованные в работе, и значения расчетных и экспериментально определенных параметров.
5. Осциллограммы выходных напряжений генератора, снятые на кальку с указанием параметров RC -цепи и критического коэффициента усиления.

Контрольные вопросы

1. Каковы условия возбуждения усилителя?
2. В усилителе с большим или меньшим коэффициентом усиления легче выполнить условие возбуждения?
3. Какой сдвиг фаз между входным и выходным напряжениями должен обеспечивать исследуемый усилитель (см. рис. 2) при заданной структуре звена обратной связи (см. рис. 1) для выполнения условия возбуждения на частоте f_0 ?
4. Что называется критическим коэффициентом усиления?
5. Чем объяснить, что частота исследуемой схемы близка к извлекаемой частоте f_0 звена обратной связи?

Работа № 22. ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА СИНУСОИДАЛЬНОГО НАПЯЖЕНИЯ С LC-КОНТУРОМ

Цель работы — ознакомиться с принципом действия и устройством генератора, собранного по схеме индуктивной трехточки.

Пояснения. Схема генератора с индуктивной трехточкой (называемая также схемой Хартлея) показана на рис. 1. Режим транзистора по постоянному току задается

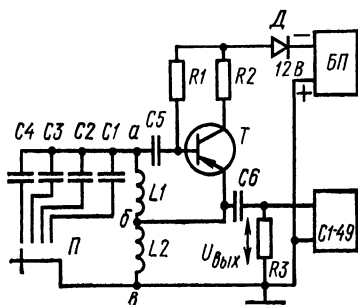


Рис. 1. Схема генератора с индуктивной трехточкой

резисторами $R1$ и $R2$ в цепи базы и цепи коллектора. Два индуктивно несвязанных дросселя высокой частоты $L1$ и $L2$ и одна из емкостей $C1—C4$, выбираемая переключателем Π , образуют колебательный контур с резонансной частотой:

$$f_0 = 1/2\pi \sqrt{LC},$$

где C — емкость подключенного конденсатора; $L = L1 + L2$ — индуктив-

ность последовательно включенных дросселей.

Положительная обратная связь, необходимая для поддержания колебаний, замыкается через эмиттерную цепь транзистора T . Если выходное напряжение контура (напряжение между точками a и b) отрицательное и растет по абсолютной величине, транзистор T приоткрывается и потенциал точки b относительно плюсовой шины питания падает, т. е. транзистор еще больше приоткрывается. При положительном напряжении U_{ab} транзистор начинает закрываться, ток через него уменьшается и потенциал точки b растет. Таким образом, условие баланса фаз для самовозбуждения схемы выполняется. Условие баланса амплитуд (см. работу № 19 формулу 1) определяется выбором транзистора с большим коэффициентом усиления базового тока, а также высокой добротностью контура. Следует отметить, что у трехточечных генераторов форма выходного напряжения заметно отличается от синусоиды.

Генераторы с LC-контурами используют в основном для получения высокочастотных колебаний. Так, подоб-

ные схемы широко применяют в качестве гетеродинов для портативных транзисторных приемников. На низких частотах такие схемы используют сравнительно редко (значительно возрастают габариты индуктивности и ухудшаются параметры колебательного контура), поэтому для получения колебаний низкой частоты используют RC -генераторы (см. работу № 19).

Оборудование и аппаратура

Электронный осциллограф С1-49 с измерением амплитуд сигналов от 20 мВ до 120 В и полосой частот от 0 до 5 МГц	1 шт.
Стабилизатор напряжения постоянного тока Б5-7 с выходным напряжением 12 В при токе нагрузки до 30 мА	1 »
Транзистор T (МП416)	1 »
Резисторы: $R1$ (МЛТ-0,5-220 кОм $\pm 5\%$)	1 »
$R2$ (МЛТ-0,5-4,7 кОм $\pm 5\%$)	1 »
$R3$ (МЛТ-0,5-16 кОм $\pm 5\%$)	1 »
Конденсаторы: $C5$ и $C6$ (МБМ-160-0,1 мкФ $\pm 10\%$)	2 »
$C1$ (МБМ-160-0,033 мкФ $\pm 10\%$)	1 »
$C2$ (КСО-5-6800 пФ $\pm 10\%$)	1 »
$C3$ (КСО-2-1200 пФ $\pm 10\%$)	1 »
$C4$ (КСО-1-750 пФ $\pm 10\%$)	1 »
Дроссели $L1$ и $L2$ высокой частоты с индуктивностью 5 мГ	2 »
Галетный переключатель P	1 »

Порядок выполнения работы

1. Подключить к исследуемой схеме осциллограф и стабилизатор напряжения. Подать на стенд напряжение и включить аппаратуру. Установить на выходе стабилизатора напряжение, равное 12 В.

2. Рассчитать зависимость частоты выходного напряжения генератора от емкости в цепи колебательного контура $f_r = f_r(C)$. Построить в прямоугольных координатах на миллиметровке эту зависимость.

3. Измерить частоту выходного напряжения генератора для различных емкостей в колебательном контуре и результаты измерения записать в табл. 1. По данным табл. 1 построить экспериментальную зависимость $f_r = f_r(C)$ на том же чертеже, где построена расчетная зависимость. Измерять частоту с помощью осциллографа, пользуясь калиброванной разверткой.

Таблица 1. Зависимость частоты выходного напряжения генератора от емкости колебательного контура

C , пФ	750	1200	6800	33000
f_r , кГц				

4. Определить амплитуду выходного напряжения генератора для различных емкостей в цепи колебательного контура и результаты измерений записать в табл. 2.

Таблица 2. Амплитуда выходного напряжения генератора

C , пФ	750	1200	6800	33000
$U_{\text{вых}}$, В				

5. Снять на кальку осциллограмму выходного напряжения генератора для произвольной емкости, указать частоту колебаний и значение емкости.

Содержание отчета

1. Наименование отчета.
2. Название и технические данные использованных измерительных приборов.
3. Схема исследуемого генератора.
4. Формулы, использованные в работе и значения расчетных и экспериментально определенных параметров; табл. 1 и 2 с результатами измерений.
5. Осциллограмма с указанием частоты выходного напряжения генератора и значения емкости.
6. Теоретическая и экспериментальная зависимости частоты колебаний от емкости в цепи колебательного контура.

Контрольные вопросы

1. Какие схемы генераторов называются трехточечными?
2. Как связана частота генератора с индуктивной трехточечной со значением емкости в цепи колебательного контура?
3. Чем определяется условие баланса фаз в схеме генератора?
4. Для какой цели в схеме генератора установлен резистор R_1 ?
5. В каком случае легче обеспечить условия самовозбуждения генератора (см. рис. 1): для транзистора с большим или меньшим коэффициентом усиления базового тока?

6. Почему частота выходного напряжения генератора совпадает с резонансной частотой колебательного контура?

7. Для чего в схеме генератора установлен конденсатор $C5$?

8. Как зависит выходное напряжение исследуемого генератора от сопротивления нагрузки?

Работа № 23. ИССЛЕДОВАНИЕ МУЛЬТИВИБРАТОРОВ НА ТРАНЗИСТОРАХ

Цель работы — ознакомиться с устройством и принципом действия простого мультивибратора с коллекторно-базовыми связями и мультивибраторов с блокировкой и фиксацией коллекторных потенциалов.

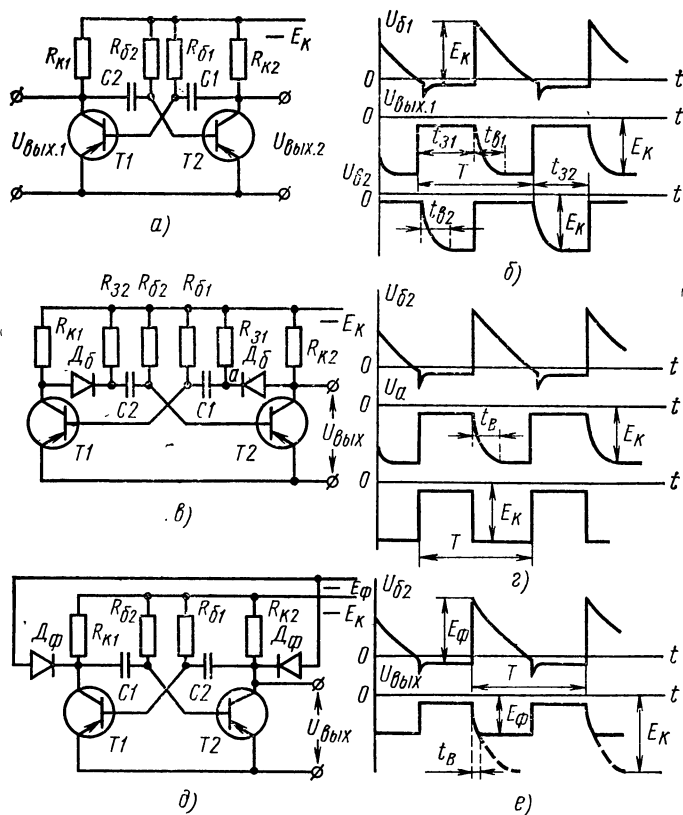


Рис. 1. Схемы и временные диаграммы работы мультивибраторов: а и б — простейшего мультивибратора, в и г — мультивибратора с блокировкой коллекторных потенциалов, д и е — мультивибратора с фиксацией коллекторных потенциалов

Пояснения. Простейшая схема мультивибратора с коллекторно-базовыми связями и временные диаграммы его работы показаны на рис. 1, а и б. Период повторения импульсов выходного напряжения

$$T = t_{31} + t_{32} = 0,7R_{61}C1 + 0,7R_{62}C2, \quad (1)$$

где $R_{61}C1 = \tau_{p1}$ — постоянная времени разряда емкости $C1$, определяющая длительность t_{31} закрытого состояния транзистора $T1$;

$R_{62}C2 = \tau_{p2}$ — постоянная времени разряда емкости $C2$, определяющая длительность t_{32} закрытого состояния транзистора $T2$.

Если $R_{K1} = R_{K2} = R_K$, $R_{61} = R_{62} = R_6$ и $C1 = C2 = C$, мультивибратор будет симметричным.

Режим отсечки закрытого транзистора обусловлен тем, что в процессе разряда конденсатора потенциал его обкладки, соединенный с базой транзистора, положителен относительно общей точки схемы. Режим насыщения открытого транзистора при установившемся коллекторном токе обеспечивается определенным соотношением между сопротивлениями резисторов R_K и R_6 . Так как условие насыщения транзистора

$$I_{6,н} \geq I_{K,н}/\beta, \quad (2)$$

где $I_{K,н}$ и $I_{6,н}$ — токи насыщения коллектора и базы полностью открытого транзистора, а β — коэффициент усиления тока базы, то

$$E_K/R_6 \geq E_K/R_K\beta \text{ или } R_6 \leq \beta R_K. \quad (3)$$

Из рис. 1, б видно, что фронты выходных импульсов мультивибратора, формирующиеся после закрытия соответствующих транзисторов, имеют значительно большую длительность, чем фронты импульсов, соответствующие моментам открытия транзисторов. Длительность фронта импульсов после закрытия транзистора определяется временем, в течение которого конденсатор $C1$ или $C2$ заряжается до напряжения питания. Эта длительность, называемая временем восстановления (или длительностью среза), зависит от постоянной времени $\tau_3 = R_K C$ заряда конденсатора и равна

$$t_в \approx 3\tau_3. \quad (4)$$

Так как обычно $R_6 \approx 10R_K$, то время восстановления составляет часть периода повторения импульсов [см.

формулы (1) и (4)]. Поэтому, во-первых, выходные напряжения мультивибратора заметно отличаются от прямоугольных (см. рис. 1, б), что ограничивает возможности его применения, а во-вторых, такой мультивибратор при несимметричной схеме может устойчиво работать только при относительно небольшой скважности (порядка 10—15), что также является его недостатком.

Мультивибратор с блокировкой коллекторных потенциалов (иногда называемый мультивибратором с отключающими диодами), имеющий прямоугольную форму выходных напряжений, показан на рис. 1, в и г. Отличие этого мультивибратора от простейшего состоит в том, что заряд времязадающих конденсаторов C после закрытия соответствующего транзистора осуществляется не через коллекторные резисторы, а через добавочные зарядные резисторы R_3 . После закрытия транзистора, например $T1$, его потенциал скачком изменяется до E_K , при этом блокирующий диод D_6 закрывается и отделяет цепь заряда емкости от коллектора. Сопротивления зарядных резисторов обычно выбирают примерно равными сопротивлениям коллекторных резисторов.

Рассмотренная схема мультивибратора, обладая прямоугольными выходными напряжениями, имеет два недостатка. Максимальная скважность такого мультивибратора при несимметричной схеме и при $R_K = R_3$ (в каждом плече) примерно вдвое меньше максимальной скважности простого мультивибратора. Кроме того, установившийся коллекторный ток открытого транзистора $I_{K.н} = E_K / R_K + R_3$ вдвое больше, чем у первой схемы. Таким образом, схема с отключающими диодами потребляет примерно вдвое большую мощность от источника питания. Для выполнения условия насыщения [см. формулу (2)] необходимо, чтобы $R_6 \leq (R_K / R_3) \beta$. Период повторения импульсов в этой схеме определяется формулой (1).

Мультивибратор с фиксацией коллекторных потенциалов, имеющий относительно небольшое время восстановления, т. е. пригодный для работы со значительной скважностью выходных напряжений (примерно 30—50), показан на рис. 1, д и е со своими диаграммами напряжений. Отличие этого мультивибратора от простейшего состоит в том, что заряд времязадающих конденсаторов после закрытия соответствующего транзистора осуществляется до напряжения фикса-

ции E_{ϕ} , меньшего, чем напряжение питания E_{κ} . Когда напряжение на коллекторе закрытого транзистора достигнет уровня E_{ϕ} , открывается фиксирующий диод D_{ϕ} и заряд конденсатора прекращается. Так как $E_{\phi} < E_{\kappa}$, то и время восстановления меньше. Обычно $E_{\phi} \approx 0,5 E_{\kappa}$. При этом время восстановления

$$t_{\text{в}} = 0,7 R_{\kappa} C,$$

а период

$$T = 0,4 (R_{\text{б1}} C_1 + R_{\text{б2}} C_2).$$

Условие насыщения в этой схеме определяется выражением (3) для простого мультивибратора. В реальной схеме, чтобы ограничиться одним источником питания, напряжение фиксации задают с помощью стабилитрона.

Мультивибратор с фиксацией коллекторных потенциалов имеет малое время восстановления по сравнению с другими рассмотренными мультивибраторами; в то же время он сложнее их, особенно по сравнению с простейшим; по сравнению с мультивибратором на отключающих диодах он имеет худшую форму выходных напряжений.

Оборудование и аппаратура

Электронный осциллограф С1-49 с измерением амплитуд сигналов от 20 мВ до 120 В и полосой частот от 0 до 5 МГц	1 шт.
Стабилизатор напряжения постоянного тока Б5-7 с выходным напряжением 12 В при токе нагрузки до 100 мА	1 »
Транзисторы: $T1-T6$ (МП21Е)	6 »
Резисторы: $R1, R4-R6, R9-R12, R15$ (МЛТ-0,5-2,2 кОм $\pm 5\%$)	9 »
$R2, R3, R13, R14$ (МЛТ-0,5-22 кОм $\pm 5\%$)	4 »
$R7, R8$ (МЛТ-0,5-12 кОм $\pm 5\%$)	2 »
Конденсаторы: $C1-C6$ (МБМ-160-0,05 $\pm 10\%$)	6 »
Диоды: $D1-D4$ (Д9Е)	4 »
Полупроводниковый стабилитрон $D5$ (КС162А)	1 »

Порядок выполнения работы

1. Подключить к исследуемым схемам мультивибраторов (рис. 2), имеющим общее питание, стабилизатор напряжения. Установить на выходе стабилизатора напряжение, равное 12 В.

2. Рассчитать для исследуемых схем периоды выходных напряжений, их частоты и записать полученные значения.

3. Измерить с помощью осциллографа, пользуясь калиброванной разверткой, периоды выходных напряжений исследуемых схем и сравнить их с расчетными значениями, определенными в п. 2 (они могут отличаться на 20—30%).

4. Рассчитать время восстановления для каждой схемы и сравнить со значениями, найденными экспериментально.

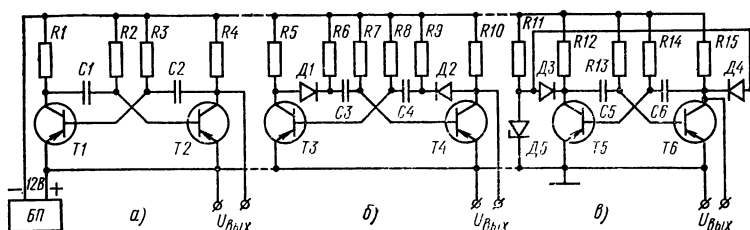


Рис. 2. Мультивибраторы, подлежащие исследованию:
 а — простейший, б — с блокировкой коллекторных потенциалов, в — с фиксацией коллекторных потенциалов

5. Считая, что минимальный коэффициент усиления базового тока любого транзистора равен 15, рассчитать нормальные значения сопротивлений базовых резисторов во всех схемах.

6. Снять на кальку осциллограммы выходных напряжений для каждого мультивибратора и указать время восстановления и период повторения импульсов.

Содержание отчета

1. Наименование отчета.
2. Название и технические данные использованных измерительных приборов.
3. Схемы исследуемых генераторов с указанием номинальных значений элементов.
4. Формулы, использованные в работе, и значения расчетных и экспериментально определенных параметров.
5. Осциллограммы выходных напряжений генераторов.

Контрольные вопросы

1. В какой из трех схем мультивибраторов при равных сопротивлениях в цепи коллекторов транзисторов сопротивления базовых резисторов будут меньше?

2. В какой из трех схем мультивибраторов можно обеспечить большую скважность выходных напряжений?

3. Как достигается прямоугольная форма выходных напряжений в мультивибраторе с отключающими диодами?

4. Каково условие насыщения транзистора в схеме простейшего мультивибратора?

5. Каковы недостатки и преимущества мультивибратора с фиксацией коллекторного напряжения, по сравнению с простейшими и отключающими диодами?

Работа № 24. ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА ПИЛООБРАЗНОГО НАПЯЖЕНИЯ

Цель работы — ознакомиться с устройством и принципом действия автогенератора пилообразного напряжения на симметричном мультивибраторе со стабилизаторами тока.

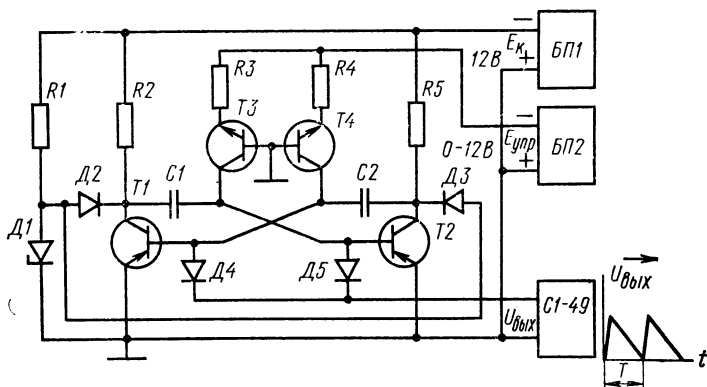


Рис. 1. Автогенератор пилообразного напряжения на мультивибраторе с фиксацией коллекторных потенциалов и разрядом времязадающих конденсаторов через стабилизаторы тока

Пояснения. Автогенератор пилообразного напряжения на симметричном мультивибраторе с фиксацией коллекторных потенциалов и разрядом времязадающих конденсаторов через стабилизаторы тока показан на рис. 1. В отличие от обычных мультивибраторов (см. работу № 22) здесь разряд времязадающего конденсатора, например C2, от напряжения фиксации до нулевого уровня осуществляется через транзистор T4, который работает как стабилизатор тока (см. работу № 12).

Во время разряда конденсатора $C2$ его левая обкладка имеет положительный потенциал относительно общей точки схемы, транзистор $T1$ закрыт и в его базу втекает только обратный ток, обычно значительно меньший, чем заданный ток разряда. Поэтому можно считать, что ток разряда конденсатора $C2$ определяется только коллекторным током транзистора $T4$. Пренебрегая падением напряжения на переходе эмиттер — база транзистора $T4$ и считая, что коэффициент передачи эмиттерного тока $\alpha=1$, получим выражение для коллекторного тока I_k , равного разрядному току I_p конденсатора $C2$:

$$I_{kT4} = I_p = E_{упр}/R4. \quad (1)$$

Так как ток разряда постоянный, напряжение на конденсаторе изменяется по линейному закону. Как известно из курса физики, ток через конденсатор

$$I = C \Delta U_c / \Delta t,$$

где ΔU_c — изменение напряжения на конденсаторе за небольшой отрезок времени Δt ; C — емкость конденсатора. Если $I = \text{const}$, то любым одинаковым отрезкам времени соответствуют одинаковые изменения напряжения, что и соответствует линейной зависимости напряжения U_c от времени t :

$$U_c = It/C.$$

В первый момент после очередного закрытия транзистора $T1$ напряжение на его базе равно $+E_\phi$. Затем напряжение на базе уменьшается, так как емкость разряжается через транзистор $T4$ постоянным током. Следовательно, положительное напряжение базы после закрытия транзистора $T1$ изменяется (уменьшается) так:

$$U_{б.э} = E_\phi - I_p t / C2 \quad (2)$$

до тех пор, пока оно не станет равно нулю. После этого транзистор $T1$ открывается, а транзистор $T2$ закрывается и на его базе напряжение изменяется так же. Положительные напряжения на базах каждого транзистора поочередно поступают через диоды $D4$ и $D5$ на выходные зажимы генератора, создавая на них пилообразное линейно-падающее напряжение.

Период T выходного напряжения для симметричной схемы определяется длительностью закрытого состояния транзистора или временем, в течение которого происхо-

дит разряд конденсатора от уровня E_{ϕ} до 0. Из выражений (1) и (2), в которых надо заменить время t на период T , получим следующую длительность периода:

$$T = E_{\phi} C_2 / I_p = E_{\phi} C_2 R_4 / E_{\text{упр}}.$$

Откуда видно, что период зависит от напряжения управления: обратно пропорционален ему и, следовательно, частота выходного напряжения прямо пропорциональна $E_{\text{упр}}$:

$$f = E_{\text{упр}} / E_{\phi} C_2 R_4. \quad (3)$$

Зависимость частоты f от напряжения $E_{\text{упр}}$ называется регулировочной или модуляционной характеристикой генератора.

Условие насыщения транзисторов в этой схеме, например для транзистора $T1$, имеет вид

$$E_{\kappa} / R_2 + I_p \leq I_{p\beta_{\text{мин}}},$$

так как ток коллектора открытого транзистора состоит из тока через резистор R_2 и тока разряда конденсатора $C1$. Учитывая выражение (1), получим условие насыщения в таком виде:

$$E_{\text{упр.мин}} \geq E_{\kappa} R_4 / (\beta_{\text{мин}} - 1) R_2. \quad (4)$$

Это выражение ограничивает по минимальному значению $E_{\text{упр}}$. С другой стороны, при больших $E_{\text{упр}}$, т. е. при разряде большим током, например конденсатора C_2 , другой конденсатор $C1$ не успеет зарядиться до напряжения фиксации. Поэтому минимальное время разряда конденсатора C_2 или наименьший период выходного напряжения должны быть больше времени среза (времени восстановления) коллекторного напряжения для мультивибратора с фиксацией коллекторных потенциалов [см. формулу (4) в работе № 22], т. е. $t_{\text{в}} = 0,7 R_2 C_1 \leq T_{\text{мин}} = E_{\phi} C_2 R_4 / E_{\text{упр.макс}}$. Учитывая тот факт, что мультивибратор симметричен и $C1 = C2$, получим значение максимально возможного напряжения

$$E_{\text{упр.макс}} \leq E_{\phi} R_4 / 0,7 R_2 \quad (5)$$

Оборудование и аппаратура

Электронный осциллограф С1-49 с открытым входом 1 шт.
 Стабилизатор напряжения БП1 с регулировкой выходного напряжения от 0 до 12 В при токе до 50 мА 1 »

Стабилизатор напряжения БП2 постоянного тока с регулировкой выходного напряжения от 0 до 12 В при токе до 30 мА	1 шт.
Вольтметр постоянного тока с пределом 30 В (М330)	1 »
Транзисторы: Т1 и Т2 (МП21Е)	2 »
Т3 и Т4 (МП37Б)	2 »
Резисторы: R1 (МЛТ-0,5-2,2 кОм±5%)	1 »
R2 и R5 (МЛТ-0,5-5,1 кОм±5%)	2 »
R3 и R4 (МЛТ-0,5-3,3 кОм±5%)	2 »
Конденсаторы: C1 и C2 (МБМ-160-0,05 мкФ±10%) .	2 »
Диоды Д2—Д5 (Д223)	4 »
Полупроводниковый стабилитрон Д1 (КС162А) . . .	1 »

Порядок выполнения работы

1. Подключить к исследуемому генератору (см. рис. 1) стабилизаторы напряжения. Установить на выходе стабилизатора, служащего источником питания E_k , напряжение 12 В. К стабилизатору, служащему источником напряжения управления $E_{упр}$, подключить вольтметр.

2. Рассчитать для исследуемого генератора минимальное $E_{упр. мин}$ и максимальное $E_{упр. макс}$ значения напряжения управления. Расчеты выполнять по формулам (4) и (5), считая $E_\phi = 8$ В, а $\beta_{мин} = 20$.

Т а б л и ц а. Модуляционная характеристика автогенератора пилообразного напряжения

I	$E_{упр}$, В					
	f , кГц					
II	$E_{упр}$, В					
	f , кГц					

3. Построить на миллиметровке расчетную модуляционную характеристику генератора для значений $E_{упр}$ с интервалами в 1 В в пределах, определенных в п. 2. Расчетные данные занести в таблицу (I). Расчетная характеристика строится по формуле (3) с использованием приведенных параметров схемы.

4. Снять экспериментально модуляционную характеристику автогенератора, изменяя $E_{упр}$ интервалами в 1 В в пределах, рассчитанных в п. 2, и занести резуль-

таты измерений в таблицу (II). По данным таблицы построить экспериментальную характеристику на том же чертеже, где изображена расчетная характеристика. Частоту выходного напряжения измеряют с помощью осциллографа, пользуясь калиброванной разверткой.

5. Снять на кальку осциллограммы выходных напряжений исследуемого автогенератора для двух — трех значений напряжения управления $E_{упр}$ и указать длительность периодов напряжений и измеренную осциллографом амплитуду импульсов.

Содержание отчета

1. Наименование отчета.
2. Название и технические данные использованных измерительных приборов.
3. Схема исследуемого автогенератора с указанием номинальных значений элементов.
4. Формулы, использованные в работе, и значения расчетных и экспериментально определенных параметров.
5. Таблица с расчетными и экспериментальными данными.
6. Модуляционные характеристики автогенератора.
7. Осциллограммы выходных напряжений генератора.

Контрольные вопросы

1. Почему при постоянном токе через конденсатор напряжение на нем изменяется по линейному закону?
2. Как зависит амплитуда выходных импульсов генератора от напряжения управления?
3. Каково условие насыщения транзисторов в схеме исследуемого генератора?
4. Почему для рассмотренной схемы напряжение управления не должно быть больше, чем $E_{упр.макс}$?
5. Для чего в исследуемую схему включены диоды $D4$ и $D5$?

Работа № 25. ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА ПРЯМОУГОЛЬНОГО НАПЯЖЕНИЯ НА ФЕРРОМАГНИТНОМ СЕРДЕЧНИКЕ И ТРАНЗИСТОРАХ

Цель работы — ознакомиться с устройством, принципом действия и назначением автогенератора прямоугольного напряжения с трансформаторной положительной обратной связью.

Пояснения. Автогенератор прямоугольного напряжения с трансформаторной положительной обратной связью показан на рис. 1, а. Трансформатор Tr выполнен на тороидальном ферритовом сердечнике, характеризующемся петлей гистерезиса, показанной на рис. 1, б. Резисторы $R1$, $R2$ и конденсатор $C1$ образуют цепочку смещения, задающую начальный режим транзисторов по

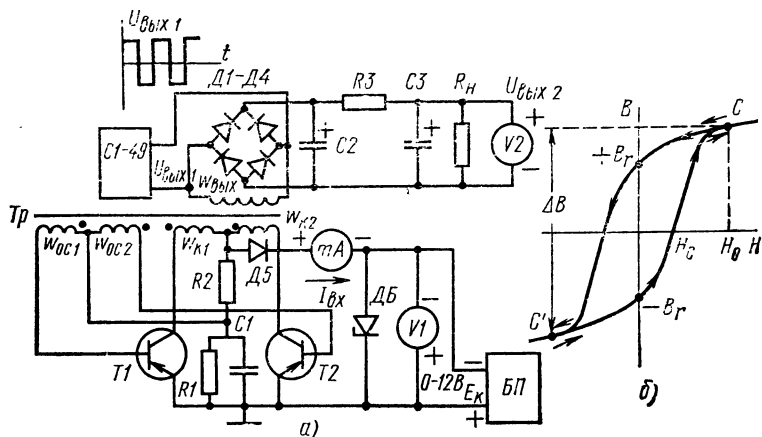


Рис. 1. Автогенератор прямоугольного напряжения с трансформаторной положительной обратной связью (а) и петля гистерезиса сердечника (б)

постоянному току, приоткрывая их. Схема работает в автоколебательном режиме таким образом, что транзисторы $T1$ и $T2$ поочередно открываются и закрываются, а сердечник трансформатора циклически перемагничивается по петле гистерезиса. Это приводит к тому, что на выходной обмотке появляется прямоугольное знакопеременное напряжение, причем открытому транзистору $T1$ соответствует одна полярность выходного напряжения, а $T2$ — другая полярность.

При открытом транзисторе $T1$ и магнитном состоянии сердечника, определяемом точкой $-B_r$ (или $+B_r$, что все равно, так как петля симметрична), соответствующей остаточной индукции. Коллекторная обмотка трансформатора, состоящая из двух частей с равным количеством витков w_{k1} и w_{k2} , включена таким образом, что ток от источника питания E_k , проходя через открытый транзис-

тор $T1$ и часть обмотки с витками $w_{к1}$, начинает переманичивать сердечник в направлении, указанном стрелкой на рис. 1, б. Так как сопротивление насыщенного транзистора мало, все напряжение питания приложено между средним выводом коллекторной обмотки и выводом, отмеченным точкой *, который в данном случае соединен через транзистор с плюсовой шиной питания. При изменении магнитной индукции в сердечнике и, следовательно, магнитного потока через него, во всех других обмотках по закону электромагнитной индукции возникает э. д. с. и на их выводах появляется напряжение, которое определяется коэффициентами трансформации между обмотками. Для выходной обмотки с числом витков $w_{вых}$

$$U_{вых} = E_k w_{вых} / w_{к1}, \quad (1)$$

для обмотки обратной связи

$$U_{o.c} = E_k w_{o.c} / w_{к1}.$$

Полярность напряжения на обмотках, соответствующая открытому состоянию транзистора $T1$, указана на рис. 1, а без скобок; в скобках указана полярность, соответствующая открытому состоянию транзистора $T2$. Итак, когда открыт транзистор $T1$, на обмотке обратной связи w_{oc1} появится напряжение, обеспечивающее его открытое состояние, т. е. это — обмотка положительной обратной связи. В это же время напряжение на обмотке w_{oc2} обеспечивает закрытое состояние транзистора $T2$. Транзистор $T1$ будет находиться в открытом состоянии до тех пор, пока сердечник не перемагнитится до некоторого состояния (точка C , находящаяся на «усе» петли гистерезиса). Изменение магнитного состояния сердечника при этом должно сопровождаться, как видно из петли гистерезиса, ростом напряженности магнитного поля (до зна-

* Обычно при изготовлении трансформатора все обмотки наматывают в одном направлении вокруг сердечника. Поэтому при работе трансформатора э. д. с. всех обмоток имеют в данный момент времени одинаковые направления: от начала обмотки к ее концу, или наоборот, в зависимости от направления магнитного потока. Таким образом, зная где конец, а где начало каждой обмотки, и полярность напряжения на одной из них, можно указать полярность напряжения на любой другой обмотке. Для правильного чтения принципиальных схем и выполнения монтажа начала обмоток (или концы) отмечают точкой на схеме и соответствующим образом маркируют выводы трансформатора.

чения H_0), т. е. увеличением тока намагничивания, протекающего через коллекторную обмотку $w_{к1}$ и открытый транзистор $T1$. Другими словами, по мере перемагничивания коллекторный ток транзистора $T1$ возрастает, а ток в базу транзистора, поддерживающий его открытое состояние, определяется по формуле

$$I_6 = U_{o.c.} / (r_6 + RI) = E_{к w_{o.c1}} / (r_6 + RI) w_{к1},$$

где r_6 — входное сопротивление транзистора в схеме с общим эмиттером.

Следовательно, при токе намагничивания I_0 общий коллекторный ток возрастает настолько, что транзистор $T1$ начнет закрываться и своим возросшим сопротивлением уменьшит напряжение, приложенное к обмотке $w_{к1}$. Следовательно, уменьшится напряжение и на других обмотках, в том числе и на обмотке $w_{o.c1}$, что приведет к уменьшению базового тока транзистора $T1$ и он еще больше начнет закрываться, уменьшая тем самым коллекторный ток и соответственно напряженность H магнитного поля в сердечнике. При этом сердечник будет перемагничиваться (из точки C в точку $+B_r$). Так как «усы» петли гистерезиса имеют наклон, перемагничивание из точки C в точку $+B_r$ будет сопровождаться изменением потока в другую сторону, т. е. с другим знаком. Поэтому на обмотке $w_{o.c2}$ возникает напряжение, полярность которого указана на рис. 1, а в скобках. Это напряжение приоткроет транзистор $T2$, что приведет к большему изменению индукции, так как возрастает ток через коллекторную обмотку $w_{к2}$. Изменение индукции вызовет увеличение напряжения на обмотке обратной связи $w_{o.c2}$, что еще больше приоткроет транзистор $T2$. В результате транзистор $T2$ быстро открывается, а транзистор $T1$ закрывается. Этот лавинообразный процесс перехода транзистора из закрытого состояния в открытое (и наоборот) при действии трансформаторной обратной положительной связи называется блокинг-процессом. Сердечник после открывания транзистора $T2$ перемагничивается в обратном направлении (точка C'). Когда магнитное состояние сердечника будет определяться точкой C' , транзистор $T2$ снова закроется, а транзистор $T1$ откроется. Далее процесс перемагничивания повторяется.

Длительность открытого состояния транзистора $T1$ или $T2$ определяется длительностью процесса перемагничивания Δt_n из точки C' в точку C (для транзистора

Т1) или из точки C в точку C' . По закону электромагнитной индукции

$$E_k = w_{k1} \Delta \Phi / \Delta t_{\pi},$$

при $E_k = \text{const}$

$$\Delta t_{\pi} E_k = \Delta \Phi w_{k1} = \Delta B S_c w_{k1}, \quad (2)$$

где $\Delta \Phi$ — изменение магнитного потока через сердечник за время Δt_{π} , соответствующее изменению индукции на ΔB (см. рис. 1, б); S_c — сечение сердечника.

Если число витков сердечника $w_{\text{вых}}$ больше, чем w_{k1} , выпрямленное и сглаженное выходное напряжения будут больше напряжения E_k в число раз, определяемое коэффициентом трансформации $k = w_{\text{вых}} / w_{k1}$. Следовательно, такое устройство можно использовать для повышения постоянного напряжения. Поэтому рассмотренную схему совместно с выпрямителем и фильтром, подключенным к выходной обмотке (см. рис. 1, а), называют преобразователем постоянного напряжения.

Из формулы (2) следует, что частота выходного напряжения зависит от параметров трансформатора и напряжения питания E_k . Так как

$$f = 1/2 \Delta t_{\pi},$$

то

$$f = E_k / 2 \Delta B S_c w_{k1}. \quad (3)$$

Из этой формулы видно, что частота линейно связана с напряжением. Следовательно, эту схему можно использовать в качестве управляемого генератора прямоугольного напряжения. Правда, выходное напряжение здесь линейно зависит от напряжения управления.

Оборудование и аппаратура

Электронный осциллограф (С1-49)	1 шт.
Стабилизатор напряжения постоянного тока с регулировкой выходного напряжения от 0 до 12 В при токе до 30 мА	1 »
Вольтметр V2 постоянного тока с пределом измерения 30 В (М330 или прибор Ц4311)	1 »
Вольтметр V1 постоянного тока с пределом измерения 15 В (М330 или прибор Ц4311)	1 »
Миллиамперметр постоянного тока с пределом измерения 15 мА (М330 или прибор Ц4311)	1 »

Трансформатор на ферритовом сердечнике из оксифера с размерами $18 \times 8 \times 5$ ($d_{\text{внеш}} \times d_{\text{внутр}} \times h$) и обмотками: $\omega_{K1} = \omega_{K2} = 40$ вит., $\omega_{O.C1} = \omega_{O.C2} = 10$ вит., $\omega_{\text{вых}} = 120$ вит., намотанными проводом ПЭВ-2, диаметром 0,12—0,15 1 шт.

Транзисторы: $T1$ и $T2$ (МП21Е) 2 »

Резисторы: $R1$ и $R3$ (МЛТ-0,5-120 Ом $\pm 5\%$) 2 »

$R2$ (МЛТ-0,5-3,6 кОм $\pm 5\%$) 1 »

$R_{\text{н}}$ (МЛТ-2-2 кОм $\pm 5\%$) 1 »

Полупроводниковые диоды $D1$ — $D5$ (Д9Е, Д9Ж) 5 »

Полупроводниковый стабилитрон $D6$ (Д815Ж) 1 »

Конденсаторы: $C1$ (МБМ-160-0,1, мкФ $\pm 10\%$) 1 »

$C2, C3$ (К50-6-5 мкФ, 100 В) 2 »

Порядок выполнения работы

1. Подключить к исследуемой схеме (рис. 1, а) измерительную аппаратуру и стабилизатор напряжения, установив на нем ручку регулировки выходного напряжения в положение, соответствующее минимальному напряжению. Включить стенд и стабилизатор напряжения, установив на его выходе напряжение, равное 5 В, убедиться, что автогенератор работает (указателем чего служит появление на выходной обмотке трансформатора прямоугольного напряжения, наблюдаемого с помощью осциллографа).

2. Рассчитать частоту автогенератора для напряжений, указанных в табл. 1, и построить теоретическую модуляционную характеристику: зависимость частоты работы от входного напряжения, т. е. от напряжения питания. При этом использовать формулу (3), считая, что $\Delta B = 1$ Тл, а $S_c = 0,5$ ($d_{\text{внеш}} - d_{\text{внутр}}) \cdot h = 5 \cdot 5$ мм² = $= 25 \cdot 10^{-6}$ м², где h — толщина сердечника.

Таблица 1. Модуляционная характеристика автогенератора прямоугольного напряжения

$E_K, \text{В}$	2	3	5	10	Расчет
$f_{\Gamma}, \text{кГц}$					
$E_K, \text{В}$					Эксперимент
$f_{\Gamma}, \text{кГц}$					

3. Снять экспериментальную модуляционную характеристику генератора, занося результаты измерений в табл. 1. Частоту измерять с помощью осциллографа, пользуясь калиброванной разверткой.

4. По данным табл. 1 построить на одном чертеже расчетную и экспериментальную модуляционные характеристики генератора.

5. Построить в прямоугольных координатах расчетную амплитудную характеристику автогенератора, используемого в качестве преобразователя постоянного напряжения, т. е. зависимость $U_{\text{вых2}} = f(E_{\text{к}})$. Для расчета использовать формулу (1).

Таблица 2. Амплитудная характеристика преобразователя

$E_{\text{к}}, \text{В}$					
$U_{\text{вых}}, \text{В}$					

6. Снять экспериментальную амплитудную характеристику преобразователя, занося показания в табл. 2 и изменяя напряжение $E_{\text{к}}$ интервалами в 1 В.

7. По данным табл. 2 построить экспериментальную амплитудную характеристику на том же чертеже, где и расчетная характеристика.

8. Определить экспериментально, пользуясь показаниями измерительных приборов, к. п. д. преобразователя при $E_{\text{к}} = 10 \text{ В}$ и заданном сопротивлении нагрузки $R_{\text{н}} = 2 \text{ кОм}$:

$$\text{к. п. д.} = P_{\text{вых2}} / P_{\text{вх}} = \dots,$$

где $P_{\text{вх}} = I_{\text{вх}} \cdot E_{\text{к}}$ — входная мощность преобразователя;
 $P_{\text{вых}} = U_{\text{вых2}}^2 R_{\text{н}}$ — выходная мощность.

Содержание отчета

1. Наименование отчета.
2. Название и технические данные использованных измерительных приборов.
3. Схема исследуемого автогенератора с указанием номинальных данных элементов.

4. Формулы, использованные в работе, и записанные значения расчетных и экспериментально определенных параметров.

5. Табл. 1 и 2 с расчетными и экспериментальными данными.

6. Модуляционные и амплитудные характеристики.

7. Осциллограмма выходного напряжения генератора.

Контрольные вопросы

1. Когда частота генератора будет больше; когда напряжение питания больше или меньше?

2. Почему экспериментальная амплитудная характеристика автогенератора, работающего как преобразователь постоянного напряжения, расположена ниже расчетной характеристики?

3. Каков принцип действия рассмотренного автогенератора?

4. Когда частота переключения генератора будет больше; когда сердечник имеет петлю гистерезиса с большей или меньшей индукцией при одинаковом значении напряженности поля?

Глава шестая **РАДИОАППАРАТУРА**

Работа № 26. СНЯТИЕ И АНАЛИЗ РЕЗОНАНСНЫХ КРИВЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО И ПАРАЛЛЕЛЬНОГО КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ КОНТУРОВ

Цель работы — исследование резонанса напряжений в последовательном колебательном контуре и резонанса токов в параллельном колебательном контуре.

Пояснения. Последовательный колебательный контур и его резонансные кривые, выражающие зависимость тока и напряжений в контуре от частоты входного напряжения, показаны на рис. 1, а и б (кривые построены при условии постоянства входного напряжения). Из рис. 1, б видно, что ток в цепи имеет максимальное значение I_p , когда частота входного напряжения равна резонансной частоте контура:

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = 1/\sqrt{LC}.$$

Следовательно, входное сопротивление $z_{вх}$ контура на резонансной частоте минимально и для рассматриваемого контура

$$z_{вх}(\omega_0) = R,$$

где R — активное сопротивление цепи, включающее активное сопротивление катушки индуктивности и внутреннее сопротивление источника входного напряжения. Поэтому на резонансной частоте ток и напряжение на контуре совпадают по фазе.

При резонансе напряжения U_L и U_C на реактивных элементах последовательного контура равны между собой и больше входного напряжения U , поэтому резонанс

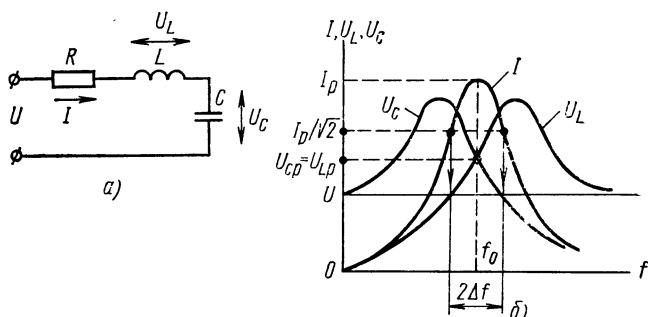


Рис. 1. Последовательный колебательный контур:
а — схема, б — резонансные кривые

в последовательном контуре называется резонансом напряжений. Величина, показывающая, во сколько раз напряжение на реактивных элементах при резонансе больше входного напряжения, называется добротностью последовательного контура

$$Q = U_{C0}/U = U_{L0}/U = \rho/R = \omega_0 L/R, \quad (1)$$

где $\rho = \sqrt{L/C}$ — волновое сопротивление контура.

Отсюда следует, что добротность тем выше, чем больше отношение индуктивности к емкости в контуре.

Из рис. 1, б также видно, что максимальное напряжение на конденсаторе соответствует частоте входного напряжения, меньшей f_0 , а максимальное напряжение на катушке индуктивности — частоте, большей f_0 . Несовпадение по частоте максимумов напряжений на реактивных элементах и максимума тока обусловлено наличием сопротивления R , которое, как видно из формулы (1), снижает добротность контура.

По резонансной кривой определяют полосу пропускания $2\Delta f$ контура как диапазон частот, для которых ток контура

$$I \geq I_p / \sqrt{2}, \quad (2)$$

где I_p — ток при резонансе.

Определение полосы пропускания графическим методом показано тонкими линиями на рис. 1, б. Полоса пропускания контура связана с добротностью выражением

$$Q2\Delta f = f_0. \quad (3)$$

Параллельный колебательный контур и его резонансные кривые, построенные при условии постоянства входного тока I , показаны на рис. 2, а и б.

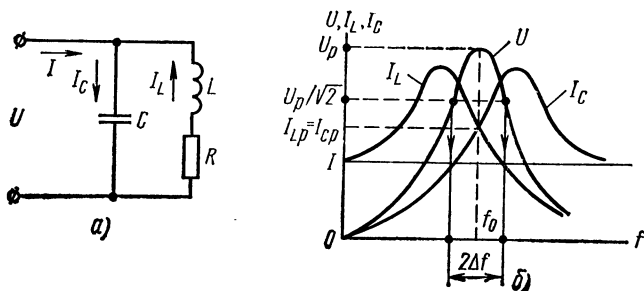


Рис. 2. Параллельный колебательный контур:
а — схема, б — резонансные кривые

Из рис. 2, б видно, что напряжение на контуре (от генератора задается ток, а не напряжение) имеет максимальное значение, когда частота входного напряжения равна резонансной частоте контура:

$$\omega_0 = 2\pi f_0 \approx 1/\sqrt{LC}.$$

Следовательно, входное сопротивление параллельного контура на резонансной частоте максимально и для рассматриваемого контура

$$z_{\text{вх}}(\omega_0) = L/CR = \rho^2/R,$$

где $\rho = \sqrt{L/C}$ — волновое сопротивление контура.

Таким образом, и в этом контуре входное сопротивление при резонансе есть активное. Токи I_{Lp} и I_{Cp} через

реактивные элементы контура при резонансе примерно равны между собой (при условии $R \leq \rho$) и больше входного тока I_p , поэтому резонанс в параллельном контуре называется резонансом токов. Величина, показывающая, во сколько раз ток через реактивные элементы больше входного тока при резонансе, называется добротностью параллельного контура

$$Q \approx I_{cp}/I_p \approx I_{Lp}/I_p \approx \rho/R.$$

Здесь также максимумы токов через реактивные элементы не совпадают между собой и с максимумом входного напряжения, причем максимум тока I_L лежит левее, а максимум тока I_C — правее резонансной частоты. Добротность Q тем меньше, чем больше R .

Полоса пропускания контура и его добротность определяют по резонансной кривой так же, как для последовательного контура, т. е. по формулам (2) и (3).

Оборудование и аппаратура

Низкочастотный генератор сигналов (ГЗ-35)	1 шт.
Вольтметр $V1$ переменного тока с пределом измерения 3 В (Ц4202 или прибор Ц4311)	1 »
Миллиамперметр $mA1$ переменного тока с пределом измерения 30 мА (Ц4202 или прибор Ц4311)	1 »
Ламповый вольтметр $V2$ (ВК7-9)	1 »
Миллиамперметры $mA2$ и $mA3$ переменного тока с пределом измерения 3 мА (Ц4202 или прибор Ц4311)	2 »
Миллиамперметр переменного тока с пределом измерения 1 мА (Ц4202 или прибор Ц4311)	1 »
Катушки индуктивности $L1$ и $L2$ ($L=55-60$ мГ), содержащие по 1000 витков, намотанных проводом ПЭВ-2 диаметром 0,3 мм на каркас диаметром 35 мм и длиной 10 см	2 »
Конденсаторы МБМ-160-0,1 мкФ	4 »
Резисторы: $R1, R2$ (МЛТ-0,5-100 Ом $\pm 5\%$)	2 »
$R3$ (МЛТ-0,5-10 кОм $\pm 5\%$)	1 »
$R'1, R'2$ (МЛТ-0,5-220 Ом $\pm 5\%$)	2 »
Тумблеры ТВ-2-1	5 »

Порядок выполнения работы

Последовательный колебательный контур

1. Подключить к схеме последовательного колебательного контура (рис. 3, а) измерительную аппаратуру.

2. Определить расчетным путем по известным параметрам схемы круговую и циклическую резонансные час-

тоты ω_0 , f_0 при $L=60$ мГ, $C=C1$ и при $L=60$ мГ, $C=C1+C'1$.

3. Определить добротность Q контура при $C=C1$, $R=R1$; при $C=C1+C'1$, $R=R1$; при $C=C1$, $R=R'1$.

4. Снять резонансные кривые последовательного контура; $I=I(f)$, $U_L=U_L(f)$, $U_C=U_C(f)$ для указанных в табл. 1 параметров. Напряжение на выходе генератора

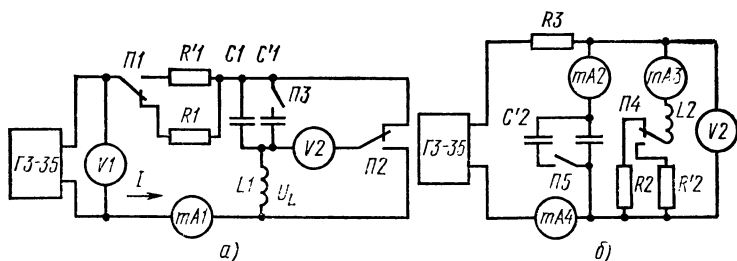


Рис. 3. Схемы исследования колебательных контуров:
а — последовательного, б — параллельного

$U=3$ В поддерживают постоянным. Напряжения на реактивных элементах измеряют вольтметром V2, переключаемым тумблером П2. Необходимые параметры устанавливают тумблерами П1 и П3.

5. По данным табл. 1 построить на миллиметровке цветными карандашами резонансные кривые $I=I(f)$, $U_C=U_C(f)$, $U_L=U_L(f)$ для указанных параметров контура и определить по ним для каждого варианта резонансную частоту, входное сопротивление контура, полосу пропускания и добротность.

После построения кривых сопоставить полученные значения добротности с параметрами контура. Сравнить расчетные и экспериментальные значения параметров.

Параллельный колебательный контур

1. Подключить к схеме параллельного колебательного контура (рис. 3, б) измерительную аппаратуру.

2. Определить расчетным путем по известным параметрам контура его циклическую и круговую резонансные частоты ω_0 и f_0 при $L=60$ мГ, $C=C2$ и при $L=60$ мГ, $C=C2+C'2$.

**Т а б л и ц а 1. Резонансные кривые последовательного
колебательного контура**

$C=C_1=0,1 \text{ мкФ},$ $R=R_1=100 \text{ Ом}$	$f, \text{ Гц}$	200							15 000
	$I, \text{ мА}$								
	$U_C, \text{ В}$								
	$U_L, \text{ В}$								
$C=C_1+C'_1=0,2 \text{ мкФ},$ $R=R_1=100 \text{ Ом}$	$I, \text{ мА}$								
	$U_C, \text{ В}$								
	$U_L, \text{ В}$								
$C=C_1=0,1 \text{ мкФ},$ $R=R'_1=220 \text{ Ом}$	$I, \text{ мА}$								
	$U_C, \text{ В}$								
	$U_L, \text{ В}$								

3. Определить добротность Q контура при $C=C_2$, $R=R_2$; при $C=C_2+C'_2$, $R=R_2$ и при $C=C_2$, $R=R'_2$.

4. Снять резонансные кривые параллельного контура для указанных в табл. 2 параметров: $U_C=U_C(f)$, $I_C=I_C(f)$, $I_L=I_L(f)$. При снятии характеристик входной ток I контура поддерживать неизменным и равным 0,2 мА.

5. По данным табл. 2 построить на миллиметровке цветными карандашами резонансные кривые $U_C=U_C(f)$, $I_C=I_C(f)$, $I_L=I_L(f)$ для указанных параметров и определить по ним для каждого варианта резонансную частоту, входное сопротивление контура, полосу пропускания и добротность. После построения кривых сопоставить

**Т а б л и ц а 2. Резонансные кривые параллельного
колебательного контура**

$C=C_2=0,1 \text{ мкФ,}$ $R=R_2=100 \text{ Ом}$	$f, \text{ Гц}$	200							15 000
	$U_C, \text{ В}$								
	$I_C, \text{ мА}$								
	$I_L, \text{ мА}$								
$C=C_2+C_2=0,2 \text{ мкФ,}$ $R=R_2=220 \text{ Ом}$	$U_C, \text{ В}$								
	$I_C, \text{ мА}$								
	$I_L, \text{ мА}$								
$C=C_2=0,1 \text{ мкФ,}$ $R=R_2=220 \text{ Ом}$	$U_C, \text{ В}$								
	$I_C, \text{ мА}$								
	$I_L, \text{ мА}$								

полученные значения добротности с параметрами контура. Сравнить расчетные и экспериментальные значения параметров.

Содержание отчета

1. Наименование отчета.
2. Названия и технические данные использованных измерительных приборов.
3. Схемы исследуемых колебательных контуров с подключениями для измерений приборами.
4. Формулы, использованные в работе, и полученные расчетным и экспериментальным путем параметры контуров: Q , $R_{\text{вх}}$, $2\Delta f$.

5. Табл. 1 и 2 и снятые резонансные кривые.

6. Резонансные кривые с указанием резонансной частоты и добротности соответствующего колебательного контура.

Контрольные вопросы

1. Какие зависимости отражают резонансные кривые колебательных контуров?

2. Чему равно входное сопротивление последовательного колебательного контура на резонансной частоте?

3. Докажите на примере последовательного колебательного контура, что сопротивление реактивных элементов при резонансе равно волновому сопротивлению контура.

4. Чему равно входное сопротивление параллельного колебательного контура на резонансной частоте?

5. Почему резонанс в параллельном контуре называется резонансом тока, а в последовательном контуре — резонансом напряжения?

6. Когда полоса пропускания контура больше, если его добротность меньше или больше?

7. В каком случае добротность контура выше: когда отношение значений индуктивности контура и емкости больше или меньше?

8. Как определяется волновое сопротивление контура и как оно связано с добротностью?

Работа № 27. ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗБИРАТЕЛЬНОГО И ПОЛОСОВОГО УСИЛИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ РЕЗОНАНСНОГО КАСКАДА

Цель работы — ознакомиться с устройством и изучить основные характеристики резонансного каскада.

Пояснения. Резонансный каскад, который может быть использован для построения избирательного или полосового усилителя, показан на рис. 1. На транзисторе $T1$, включенном по схеме с общей базой, собран сам резонансный каскад, образующий с выходным каскадом (схема с общим коллектором) на транзисторе $T2$ резонансный усилитель.

Избирательный усилитель на основе этого резонансного каскада образуется в том случае, когда коллекторной нагрузкой транзистора $T1$ служит один параллельный контур $L1, C3$, подключаемый к источнику питания переключателем $П1$ и имеющий на резонансной частоте $f_0 = 1/2\pi\sqrt{LC}$ максимальное сопротивление. Поэтому при резонансе переменная составляющая тока коллектора транзистора $T1$, задаваемая входным переменным напряжением $U_{вх}$, создает на контуре (и, следова-

тельно, на выходе каскада) наибольшее переменное напряжение. Нагрузка снижает коэффициент усиления и ухудшает добротность каскада, поэтому к нему подключен эмиттерный повторитель T_2 , имеющий большое входное сопротивление и коэффициент усиления по напряжению, близкий к 1.

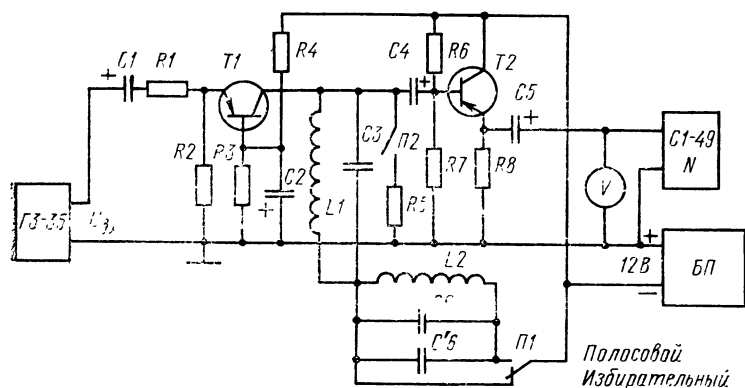


Рис. 1. Схема исследования избирательного и полосового усилителей на основе резонансного каскада

По частотной характеристике избирательного усилителя на основе резонансного каскада (рис. 2, а) определяют полосу пропускания каскада при условии

$$K > K(\omega_0)/\sqrt{2}.$$

и его добротность

$$Q = f_0/2\Delta f. \quad (1)$$

Полосовой усилитель в отличие от избирательного должен обеспечивать большое усиление в более широкой полосе частот и может быть выполнен двумя способами: последовательным соединением нескольких избирательных каскадов с одиночными контурами, имеющими разную частоту резонанса, или применением каскадов с полосовыми фильтрами. Причем во втором случае колебательные контуры, составляющие полосовой фильтр, могут быть связанными (т. е. влияющими друг на друга) или независимыми — одиночными, с разными резонансными частотами.

Полосовой усилитель в данном случае образуется, когда коллекторной нагрузкой служат два последовательно включенных колебательных контура $L1, C3$ и $L2, C6$, причем их резонансные частоты не совпадают.

Частотные характеристики полосового усилителя показаны на рис. 2, б, где кривая 1 соответствует включению контура $L1, C3$, кривая 2 — контура $L2, C6$, а кривая 3 — последовательному включению обоих контуров в коллекторную цепь транзистора $T1$. Следует отметить,

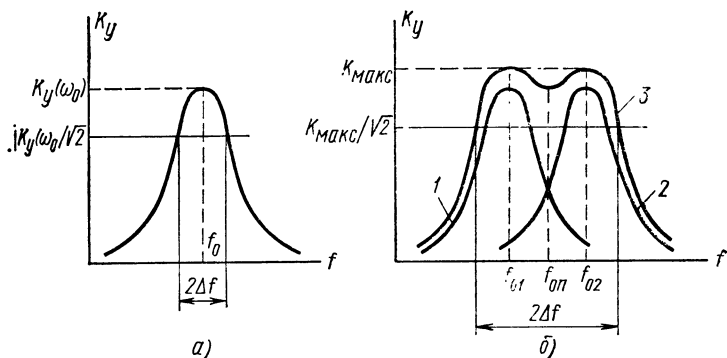


Рис. 2. Частотные характеристики усилителей:
а — избирательного, б — полосового

что суммарную частотную характеристику нельзя получить суммированием кривых 1 и 2, так как напряжения на колебательных контурах сдвинуты относительно друг друга по фазе. Форма характеристики 3 зависит от того, насколько разнесены частоты контуров.

Полосу пропускания полосового усилителя определяют на уровне 0,7 от максимального коэффициента усиления, а добротность — по формуле (1), причем за резонансную принимают частоту

$$f_{\text{ср}} = (f_{01} + f_{02})/2.$$

Оборудование и аппаратура

Электронный осциллограф С1-49 с измерением амплитуд сигналов от 20 мВ до 120 В и полосой частот от 0 до 5 МГц	1 шт.
Стабилизатор напряжения постоянного тока (Б5-7) с выходным напряжением 12 В при токе до 50 мА	1 »

Генератор низкой частоты ГЗ-35 с диапазоном частот от 20 Гц до 200 000 Гц и выходным напряжением от 0 до 8 В	1 шт.
Ламповый вольтметр (ВК7-9)	1 »
Транзисторы: Т1 (МП21В)	1 »
Т2 (КТ326А)	1 »
Резисторы: R1 (МЛТ-0,5-220 Ом±5%)	1 »
R2, R3 (МЛТ-0,5-560 Ом±5%)	2 »
R4 (МЛТ-0,5-1,0 кОм±5%)	1 »
R5 (МЛТ-0,5-10 кОм±5%)	1 »
R6 (МЛТ-0,5-33 кОм±5%)	1 »
R7 (МЛТ-0,5-41 кОм±5%)	1 »
R8 (МЛТ-0,5-6,2 кОм±5%)	1 »
Конденсаторы: С3, С6 (МБМ-160-0,1 мкФ)	2 »
С'6 (МБМ-160-0,05 мкФ)	1 »
С1 (К50-6-50,0 мкФ—25 В)	1 »
С2, С4 (К53-4-10,0 мкФ—15 В)	2 »
С5 (МБМ-160-1,0 мкФ)	1 »
Катушка индуктивности $L \approx 60$ мГ, содержащая 1000 витков, намотанных проводом ПЭВ-2 диаметром 0,3 мм на каркас, длиной 10 см и диаметром 35 мм	2 »
Тумблер ТВ-2-1	2 »

Порядок выполнения работы

1. Рассчитать по известным параметрам схемы резонансную частоту f_0 избирательного усилителя на одиночном контуре $L1, C3$.

2. Подключить измерительные приборы к исследуемой схеме и снять частотную характеристику избирательного усилителя на одиночном контуре $L1, C3$ при разомкнутом и замкнутом переключателе $P2^*$. Результаты измерений занести в табл. 1. При снятии характеристик напряжение на входе усилителя поддерживать постоянным, измеряя его с помощью осциллографа. Уровень входного напряжения должен быть таким, чтобы выходное напряжение, измеряемое вольтметром V , даже при резонансной частоте не превышало 2—2,5 В.

3. По данным табл. 1 построить на одном графике частотные характеристики для обоих положений переключателя $P2$. Расчетные значения коэффициента усиления занести в табл. 1. При построении частотных характеристик за начало отсчета принять такое значение частоты,

* При снятии частотных характеристик интервалы изменений частоты генератора следует выбирать таким образом, чтобы изменения выходного напряжения при каждом изменении частоты не превосходили 0,2 В. Рабочая полоса частот составляет примерно 300—500 Гц.

**Т а б л и ц а 1. Частотная характеристика
избирательного усилителя**

$U_{вх} = \dots$ мВ	$R5 = \infty$	$f, \text{ кГц}$	0,1					10
		$U_{вых}, \text{ В}$						
		K						
	$R5 = 10 \text{ кОм}$	$U_{вых}, \text{ В}$						
		K						

которому соответствует коэффициент усиления, примерно равный 0,1 его максимального значения.

4. По построенным характеристикам определить резонансную частоту, полосу пропускания, добротность и коэффициент усиления на резонансной частоте.

5. Рассчитать резонансную частоту контура $L2, C6$ и определить частоту $f_{оп}$ полосового фильтра.

6. Снять частотную характеристику полосового усилителя для обоих положений переключателя $П2$ и занести показания в табл. 2. При снятии характеристик пользоваться указанием п. 2.

Т а б л и ц а 2. Частотная характеристика полосового усилителя

$U_{вх} = \dots$ мВ	$R5 = \infty$	$f, \text{ кГц}$	0,1					10
		$U_{вых}, \text{ В}$						
		K						
	$R5 = 10 \text{ кОм}$	$U_{вых}, \text{ В}$						
		K						

7. По данным табл. 2 построить на одном графике характеристики полосового усилителя для обоих положений переключателя П2.

8. По построенным характеристикам определить частоту $f_{оп}$, коэффициент усиления на этой частоте, полосу пропускания и добротность полосового усилителя при $R5 = \infty$ и при $R5 = 10$ кОм. Сравнить характеристики и параметры полосового и избирательного усилителей.

Содержание отчета

1. Наименование отчета.
2. Название и технические данные использованных измерительных приборов.
3. Схема исследования избирательного и полосового усилителей на основе резонансного каскада.
4. Расчетные и экспериментально определенные параметры усилителей.
5. Табл. 1 и 2 и частотные характеристики усилителей.

Контрольные вопросы

1. В каком случае коэффициент усиления избирательного усилителя на резонансной частоте больше: когда эффективное сопротивление параллельного контура больше или меньше?
2. Что происходит с характеристиками избирательного усилителя при подключении нагрузки: полоса пропускания расширяется или сужается; добротность растет или падает; коэффициент усиления увеличивается или уменьшается?
3. Какие способы построения полосовых усилителей вы знаете?
4. Чем отличаются частотные характеристики полосового и избирательного усилителей?
5. Почему для рассмотренного полосового усилителя нельзя получить частотную характеристику суммированием характеристик каскада, построенных для каждого контура?

Работа № 28. ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНОГО ДЕТЕКТОРА И АМПЛИТУДНОГО ОГРАНИЧИТЕЛЯ

Цель работы — ознакомиться с принципом действия, определить параметры, снять амплитудную и основную характеристики частотного детектора, работающего с амплитудным ограничителем.

Пояснения. В схеме простого частотного детектора с амплитудным ограничителем, показанной на рис. 1, два одиночных параллельных колебательных контура $L1, C3$ и $L2, C4$ настроены на разные частоты и имеют несколько

разные добротности. Резонансные кривые параллельных колебательных контуров, построенные на одном графике, показаны на рис. 2, а. При условии постоянства амплитуды тока через контур напряжение U_k на нем максимально на резонансной частоте

$$f_0 = 1/2\pi \sqrt{LC}.$$

Резонансная частота f_{02} контура $L2, C4$ меньше резонансной частоты f_{01} контура $L1, C3$. На несущей частоте f_n (соответствующей точке пересечения резонансных кривых) напряжения U_{k1} и U_{k2} на последовательно включен-

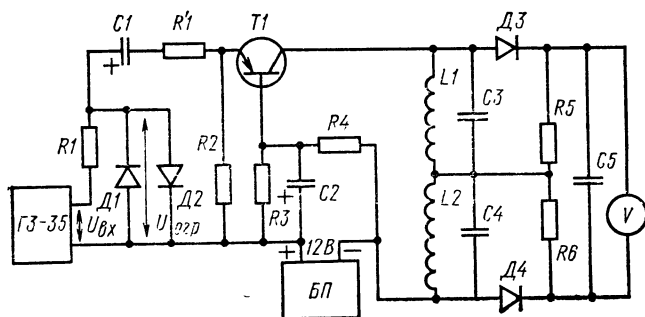


Рис. 1. Схема простого частотного детектора с амплитудным ограничителем

ных контурах равны, поэтому равны постоянные напряжения на резисторах $R5$ и $R6$. А так как они направлены встречно, то выходное постоянное напряжение частотного детектора на сглаживающем конденсаторе $C5$ будет равно нулю.

При отклонении частоты в меньшую сторону от f_n напряжение на втором контуре увеличивается, а на первом контуре уменьшается и на выходе детектора появляется напряжение определенного знака. При отклонении частоты в другую сторону от f_n растет напряжение на первом контуре и падает на втором, следовательно, на выходе появляется напряжение другой полярности. Рабочая полоса частот детектора лежит между f_{02} и f_{01} . Зависимость напряжения на выходе детектора при изменении частоты входного сигнала, называемая основной характеристикой детектора, показана на рис. 2, б.

В схеме, показанной на рис. 1, входной сигнал в виде напряжения переменного тока подается на каскад с общей базой (транзистор $T1$), коллекторной нагрузкой которого служат последовательно включенные контуры. Работа такого резонансного каскада была рассмотрена в работе № 26.

Выходной сигнал частотного детектора должен определяться только частотой входного сигнала и не зависеть от его амплитуды, поэтому частотный детектор обычно работает с амплитудным ограничителем. В приведенной схеме ограничение напряжения осуществляется на входе частотного детектора ограничительной цепочкой, состоящей из резистора $R1$ и встречно включенных диодов $D1$ и $D2$. При малых входных напряжениях (до 0,5 В) сопротивления диодов велики и входной сигнал поступает без ослабления на вход каскада с общим эмиттером. С ростом амплитуды входного напряжения сопротивления диодов падают и происходит ослабление сигнала, поступающего на вход усилительного каскада. Так как прямое напряжение на кремниевом диоде мало зависит от тока через него, то переменное напряжение $U_{огр}$ также слабо зависит

от входного напряжения, начиная с некоторого порогового значения. Этот уровень входного напряжения называется порогом ограничителя. Зависимость выходного напряжения всей схемы частотного детектора от входного напряжения называется его амплитудной характеристикой. Ее вид для некоторой частоты f_2 показан на рис. 2, в. Для нормальной работы детектора уровень входного напряжения должен быть больше порогового значения. В этом случае при воздействии помех на амплитуду входного сигнала напряжение на выходе детектора не изменяется, так как оно зависит только от частоты входного сигнала.

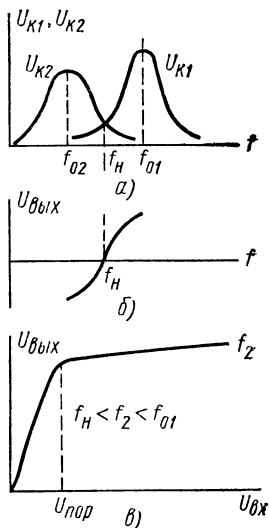


Рис. 2. Резонансные кривые параллельных контуров (а), основная (б) и амплитудная (в) характеристики частотного детектора

Оборудование и аппаратура

Стабилизатор напряжения постоянного тока Б5-7 с выходным напряжением 12 В при токе нагрузки до 50 мА	1 шт.
Электронный осциллограф С1-49 с измерением амплитуд сигналов от 20 мВ до 120 В и полосой частот от 0 до 5 МГц	1 »
Ламповый вольтметр для измерения постоянного напряжения ВК7-9	1 »
Низкочастотный генератор сигналов ГЗ-35 с диапазоном частот от 20 Гц до 200 кГц и выходным напряжением до 8 В	1 »
Транзистор Т1 МП21В	1 »
Резисторы: R1 (МЛТ-0,5-100 Ом±5%)	1 »
R'1 (МЛТ-0,5-220 Ом±5%)	1 »
R2, R3 (МЛТ-0,5-560 Ом±5%)	2 »
R4 (МЛТ-0,5-1 кОм±5%)	1 »
R5 и R6 (МЛТ-0,5-15 кОм±5%)	2 »
Диоды: Д1 и Д2 (Д233), Д3 и Д4 (Д9Д)	4 »
Катушки индуктивности L1 и L2 ($L \approx 60$ мГ), содержащие 1000 витков провода ПЭВ-2 диаметром 0,3 мм, намотанных на каркас, длиной 10 см и диаметром 35 мм	2 »
Конденсаторы: C1, C2 (К50-6-25-50,0 мкФ)	2 »
C3 (МБМ-160-0,1 мкФ)	1 »
C4 (МБМ-160-0,15 мкФ)	1 »
C5 (МБГО-160-10,0 мкФ)	1 »

Порядок выполнения работы

1. Подключить к схеме частотного детектора (см. рис. 1) измерительную аппаратуру и блок питания, установив на нем напряжение 12 В.

2. Рассчитать граничные частоты f_{01} и f_{02} исследуемого детектора. Снять экспериментально основную характеристику детектора, занося показания в табл. 1. Прежде чем снимать характеристику, следует экспериментально определить рабочий диапазон частот исследуемого детектора, т. е. частоты f_{01} и f_{02} . Для чего следует установить входное напряжение схемы примерно на уровне 2 В и, плавно изменяя частоту генератора в районе рассчитанных значений f_{01} и f_{02} , найти такое значение частоты, при котором выходной вольтметр схемы покажет напряжение, близкое к нулю на пределе 1 В или 3 В. Это значение будет соответствовать частоте f_n . Увеличивая частоту от значения f_n , надо определить момент, при котором выходное напряжение детектора перестает расти с увеличением частоты (оно может при даль-

нейшем увеличении частоты и падать). Этому моменту будет соответствовать частота f_{01} . Уменьшая частоту генератора от значения f_H (при этом выходное напряжение детектора меняет знак), найти аналогично частоту f_{02} . При изменении частоты следует учитывать, что рабочий диапазон достаточно узок (300—500 Гц), поэтому частоту необходимо изменять достаточно плавно и медленно. После определения частот f_{01} и f_{02} снимают основную характеристику детектора таким образом, чтобы каждому изменению частоты соответствовало изменение выходного напряжения примерно на 0,25 В. Перед снятием характеристики необходимо убедиться, что входной сигнал превышает пороговое значение. Для чего, установив частоту f_{01} или f_{02} , убедиться по показаниям выходного вольтметра, что увеличение уровня входного сигнала не приводит к заметному изменению выходного напряжения.

Таблица 1. Основная характеристика частотного детектора

f , кГц							
$U_{\text{вых}}$, В							

3. По данным табл. 1 построить основную характеристику частотного детектора, отметив на ней частоты f_{01} , f_{02} и f_H .

4. Снять амплитудные характеристики детектора для экспериментально определенных частот f_{01} и f_{02} , занося показания в табл. 2. Измеряют амплитуду входного напряжения, изменяемого от нуля через интервалы, при которых выходное напряжение изменяется на 0,5 В, осциллографом, подключенным к выходу генератора.

5. По данным табл. 2 построить амплитудные характеристики детектора для трех частот и определить по ним пороговое напряжение $U_{\text{пор}}$ детектора.

6. Установить частоту генератора, равную несущей частоте, а его выходное напряжение — больше порогового. Установить минимальную скорость развертки луча осциллографа, подключив его к выходу детектора. Циклически изменяя частоту генератора (модулируя ее) поворотом ручки регулировки то влево, то вправо от по-

Т а б л и ц а 2. Амплитудная характеристика детектора

$f_{01} = \dots \text{кГц}$	$U_{\text{вх}}, \text{ мВ}$						
	$U_{\text{вых}}, \text{ В}$						
$f_{02} = \dots \text{кГц}$	$U_{\text{вх}}, \text{ мВ}$						
	$U_{\text{вых}}, \text{ В}$						

ложения, соответствующего несущей частоте, убедиться в появлении на выходе детектора циклического напряжения, наблюдая его на экране осциллографа.

Содержание отчета

1. Наименование отчета.
2. Название и технические данные использованных измерительных приборов.
3. Схема частотного детектора с амплитудным ограничителем и подключенными для измерений приборами.
4. Расчетные и экспериментальные параметры частотного детектора: f_{01} , f_{02} , $f_{\text{н}}$, $U_{\text{пор}}$.
5. Табл. 1 и 2 с результатами измерений.
6. Графики основной и амплитудной характеристик детектора.

Контрольные вопросы

1. Каков принцип работы частотного детектора?
2. Какова полярность выходного напряжения детектора при частоте входного сигнала большей, чем $f_{\text{н}}$.
3. Что называется основной характеристикой частотного детектора?
4. Для чего в схему частотного детектора вводят ограничитель амплитуды?
5. Что называется порогом частотного детектора при его совместной работе с амплитудным ограничителем?

Р а б о т а № 29. ИЗМЕРЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАДИОПРИЕМНИКОВ

Ц е л ь р а б о т ы — ознакомиться с основными параметрами радиоприемников и техникой их измерения для диапазона средних и длинных волн.

Пояснения. Чувствительность приемника определяется напряжением на его входе, при котором на выходе устанавливается нормальная мощность, обычно равная 0,1 номинальной. Принято измерять чувствительность приемников при коэффициенте модуляции $m=0,3$ (30%) и частоте модуляции 400 или 1000 Гц. Чувствительность современных радиоприемников лежит в пределах от 20 до 500 мкВ, а телевизионных — 250—100 000 мкВ. Чувствительность приемников с магнитной антенной характеризуется минимальной напряженностью электромагнитного поля в месте приема и составляет 1—3 мВ/м.

Номинальной выходной мощностью $P_{\text{вых}}$ называется максимальная выходная мощность, при которой коэффициент искажения выходного напряжения не превышает допустимого (установленного) значения. Удобнее измерять не выходную мощность, а выходное напряжение на нагрузке. При этом

$$P_{\text{вых}} = U_{\text{вых}}^2 / R_{\text{н}} \text{ и } P_{\text{ном}} = U_{\text{ном}}^2 / R_{\text{н}},$$

где $R_{\text{н}}$ — сопротивление нагрузки (для радиоприемников — это сопротивление звуковой катушки громкоговорителя). Поскольку нормальная мощность

$$P_{\text{нор}} = 0,1 P_{\text{ном}},$$

то выходное напряжение $U_{\text{нор}}$, соответствующее нормальной мощности, можно определить по формуле

$$0,1 U_{\text{ном}}^2 / R_{\text{н}} = U_{\text{нор}}^2 / R_{\text{н}},$$

т. е.

$$U_{\text{нор}} \approx 0,3 U_{\text{ном}}.$$

Полосой пропускания высокочастотной части при приеме амплитудно-модулированных сигналов называется интервал частот, на границах которого чувствительность ухудшается в $\sqrt{2}$ раз или на 3 дБ по сравнению с чувствительностью на резонансной частоте. В современных радиоприемниках полоса пропускания равна 5—6 кГц, а высокого класса — до 10—12 кГц. Иногда отсчет полосы пропускания делают на уровне 0,5 от резонансной чувствительности.

Избирательность приемника по соседнему каналу показывает, во сколько раз ухудшается чувствительность приемника при расстройке на 10 кГц. В радиовещатель-

ных приемниках она находится в пределах от 20 до 60 дБ.

Избирательность по зеркальному каналу определяется при расстройке на удвоенную промежуточную частоту.

Диапазон принимаемых частот — это область частот, на которые может быть настроен приемник. Современные радиоприемники строятся на диапазоны: 150—420 кГц (2000—723 м) — длинные волны; 520—1600 кГц (576—188 м) — средние волны; 4—13 мГц (76—23 м) — короткие волны.

Уровень фона определяется как отношение

$$K_{\phi} = U_{\phi} / U_{\text{ном}},$$

где U_{ϕ} — напряжение на выходе приемника при замкнутом входе усилителя низкой частоты.

Предел действия АРУ характеризует степень постоянства сигнала на выходе

приемника при изменении уровня сигнала на входе. Для приемников среднего класса изменению входного сигнала в 100 раз (40 дБ) соответствует изменение выходного напряжения в 5—10 раз (т. е. на 14—20 дБ).

Кроме того, для оценки свойств приемников используют частотные характеристики приемного и низкочастотного трактов усиления. В схеме испытания радиоприемника, имеющего антенный вход, показанной на рис.

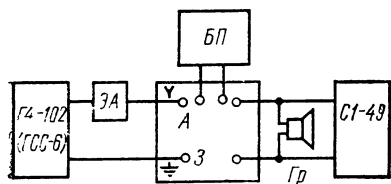


Рис. 1. Схема испытания радиоприемника

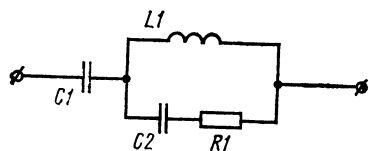


Рис. 2. Эквивалент антенны

1, ЭА — эквивалент антенны (рис. 2), ГСС — генератор стандартных сигналов высокой частоты, предназначенных для создания напряжения на входе радиоприемника. В этом генераторе предусмотрено устройство для измерения действующего значения напряжения выходных сигналов. Для наблюдения формы выходного напряжения приемника служит осциллограф С1-49, а для измерения его — вольтметр V .

Оборудование и аппаратура

Генератор стандартных сигналов высокой частоты Г4-102 (или ГСС-6)	1 шт.
Электронный осциллограф С1-49 с измерением амплитуд сигналов от 20 мВ до 120 В и полосой частот от 0 до 5 МГц	1 »
Ампервольтметр Ц4311 с пределами измерения по переменному току от 0,75 до 750 В и расширенной полосой частот на низких пределах измерения (0,75—7,5 В) от 55 до 16 000 Гц	1 »
Супергетеродинный радиоприемник любого класса, предназначенный для работы с внешней антенной и имеющий гнезда, соединенные с выходом усилителя низкой частоты	1 »
Эквивалент антенны, содержащий:	
резистор $R1$ (МЛТ-0,5-390 Ом $\pm 5\%$)	1 »
конденсаторы: $C2$ (КСОТ-1-250-Г-390 пФ)	1 »
$C1$ (КСОТ-1-250-Г-220 пФ)	1 »
катушку индуктивности $L=20$ мкГ	1 »

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему для исследования радиоприемника (см. рис. 1).

2. Определить экспериментально номинальную выходную мощность $P_{\text{ном}}$ приемника для заданного сопротивления катушки громкоговорителя. Для определения $P_{\text{ном}}$ следует установить несущую частоту задающего генератора примерно в середине диапазона длинных или средних волн. Установить коэффициент внутренней модуляции выходного сигнала генератора $m=0,3$ (30%). Поставить регулятор громкости (если он есть) в положение, соответствующее максимуму усиления в тракте низкой частоты. Настроить приемник на заданную частоту по максимуму выходного напряжения. Увеличить выходное напряжение генератора до такого значения, при котором появляются различимые «на глаз» искажения в кривой выходного напряжения, наблюдаемой на экране осциллографа. Это напряжение и будет $U_{\text{ном}}$.

3. Определить чувствительность приемника в середине диапазона средних $E_{\text{а.ср}}$ и длинных $E_{\text{а.дл}}$ волн. Для определения чувствительности следует установить несущую частоту генератора в середине диапазона, на котором определяется чувствительность. Установить коэффициент модуляции $m=0,3$. Регулятор громкости поставить в положение максимума усиления. Настроить приемник на

несущую частоту генератора по максимуму выходного напряжения. Напряжение входа увеличивать до тех пор, пока на выходе приемника напряжение не возрастет до нормального, равного $0,3 U_{\text{ном}}$. Полученное значение E_a отсчитывают по шкале выходного напряжения ГСС.

4. Определить для исследуемого приемника диапазоны принимаемых частот на длинных и средних волнах. Для определения граничных частот установить коэффициент модуляции $m=0,3$. Установить регулятор настройки частоты приемника в одно из граничных положений диапазона, а регулятор громкости — в положение максимума усиления. Настроить генератор на максимум звука или выходного напряжения при минимуме входного, зафиксировать частоту, соответствующую границе диапазона.

5. Определить уровень фона приемника.

6. Определить полосу пропускания приемного тракта (высокочастотной части) любого поддиапазона.

Для определения полосы пропускания настроить генератор на какую-нибудь частоту поддиапазона длинных или средних волн. Установить коэффициент модуляции $m=0,3$. Настроить приемник на частоту генератора. Увеличить напряжение генератора до такого значения, при котором выходное напряжение приемника будет равно нормальному ($0,3 U_{\text{ном}}$). Затем, увеличив напряжение генератора в $\sqrt{2}$ раз (в 1,4 раза), расстроить его сначала в одну, а потом в другую сторону так, чтобы на выходе снова получалось напряжение, равное нормальному. Изменение частоты, определяемое по шкале генератора, от одного положения расстройки до другого дает полосу пропускания.

7. Определить избирательность приемника по соседнему каналу для диапазона длинных и средних волн. Измеряют избирательность S_c по соседнему каналу следующим образом. Сначала измеряют чувствительность приемника E_{a0} при точной настройке ГСС на заданную частоту. Затем, не меняя настройки приемника, изменяют частоту ГСС на ± 10 кГц и вновь измеряют чувствительность E_a при расстройке. Отношение чувствительности при расстройке к резонансной чувствительности в логарифмических единицах дает избирательность по соседнему каналу, выраженную в децибелах:

$$S_c = 20 \lg E_a / E_{a0}.$$

8. Другие параметры и характеристики приемника определяют по указанию преподавателя.

Содержание отчета

1. Наименование отчета.
2. Название, технические данные использованных измерительных приборов и радиоприемника.
3. Схема исследования приемника и эквивалента антенны.
4. Названия и значения определенных параметров радиоприемника.

Контрольные вопросы

1. Каковы основные параметры радиоприемника?
2. Каков принцип действия АРУ?
3. Что называется нормальным выходным напряжением приемника?
4. Как определяют чувствительность приемника?
5. Что называется номинальной выходной мощностью приемника?
6. Какова несущая частота зеркального канала?
7. Что такое коэффициент амплитудной модуляции?

Глава седьмая ЭЛЕМЕНТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Работа № 30. ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИГГЕРА

Цель работы — ознакомиться с назначением и принципом действия триггера на транзисторах с отдельным и счетным входами.

Пояснения. К триггеру предъявляют требования по сохранению устойчивости занимаемого состояния сколь угодно долго до прихода запускающего импульса, надежности и скорости переброса из одного состояния в другое с приходом каждого запускающего импульса.

Схема симметричного триггера ($R1-R2$, $R3-R4$, $R5-R6$), подлежащего исследованию, показана на рис. 1, а. В исходном состоянии один из транзисторов $T1$ или $T2$ открыт, а другой закрыт. Режим отсечки закрытого транзистора (см. работу № 13) обеспечивается источником напряжения смещения $+E_{см}$. Если в исходном состоянии транзистор $T1$ закрыт, условие его надежного запираения,

учитывая, что напряжение $U_{кэп}$ открытого транзистора $T2$ практически равно нулю, будет выглядеть так:

$$E_{см}/R5 \geq I_{к.о.макс} \quad (1)$$

где $I_{к.о.макс}$ — максимальное значение обратного тока транзистора, соответствующее наивысшей температуре окружающей среды, при которой триггер должен сохра-

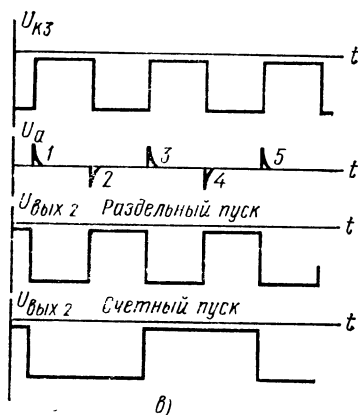
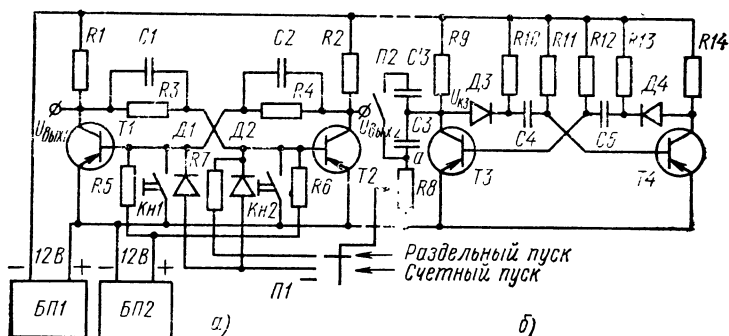


Рис. 1. Схемы симметричного триггера (а), запускающего генератора (б) и временные диаграммы их работы (в)

нять работоспособность. Условие (1) показывает, что на базе закрытого транзистора должен быть положительный потенциал относительно эмиттера.

Режим насыщения транзистора $T2$ в этом случае обеспечивается током от источника питания E_k через резисторы $R1$ и $R3$ при условии

$$R1 + R3 \leq \beta_{мин} R2, \quad (2)$$

где β_{\min} — минимальный коэффициент усиления базового тока транзистора. Так как триггер симметричен, условия (1) и (2) справедливы для обоих транзисторов.

Переключается триггер подачей запускающих импульсов на базы (или на коллекторы) транзисторов. Различают два режима подачи импульсов: раздельный и счетный запуски.

Режим раздельного запуска имеет два варианта: при первом переключение триггера осуществляется подачей на базу одного транзистора импульсов с чередующейся полярностью, а при втором импульсы одной полярности (положительные или отрицательные) поступают поочередно то на один, то на другой транзистор. В работе рассматривается первый вариант раздельного запуска триггера, осуществляемый подачей импульсов с чередующейся полярностью на базу транзистора $T2$ через резистор $R7$ и переключатель $П1$. Разнополярные чередующиеся импульсы формируются цепочкой $C3, R8$, которая обладает малой постоянной времени заряда и разряда. Когда на эту цепочку поступает прямоугольное напряжение от мультивибратора с блокировкой коллекторных потенциалов (см. рис. 1, б), на ее выходе появляются короткие импульсы (1, 2, 3, 4...), соответствующие моментам переключения напряжения мультивибратора. Полярность импульса определяется направлением изменения напряжения при переключении: так, изменению напряжения $U_{к.з}$ от $-E_k$ до 0 (т. е. в положительную сторону) соответствует положительный выходной импульс, а изменению $U_{к.з}$ от 0 до $-E_k$ — отрицательный. Положительный импульс (например, 1) закрывает транзистор $T2$, поэтому открывается транзистор $T1$. Триггер перебрасывается. С приходом следующего (отрицательного) импульса снова открывается транзистор $T2$, а $T1$ закрывается и т. д. Диаграмма выходного напряжения $U_{вых2}$ триггера показана на рис. 1, в.

Минимальное значение амплитуды входного импульса, при котором начинается устойчивое переключение триггера, называемое порогом срабатывания, определяется параметрами схемы и транзисторов. Способ раздельного запуска не критичен к длительности и амплитуде входных импульсов.

Режим счетного запуска характерен тем, что входные импульсы одной полярности поступают сразу на оба транзистора. В приведенной схеме (см. рис. 1)

положительный импульс с цепочки $C3, R8$ через диоды $D1$ и $D2$ поступает одновременно на базы обоих транзисторов. Так как в исходном состоянии один транзистор был закрыт (как условились выше, $T1$), закрывается транзистор $T2$ и оба транзистора, пока действует входной импульс, оказываются в закрытом состоянии. По окончании входного импульса триггер должен обязательно изменить свое состояние, т. е. транзистор $T2$ должен открыться, а транзистор $T1$ — закрыться.

Если бы форсирующие конденсаторы отсутствовали, процесс переключения триггера после окончания входного импульса мог бы развиваться в любую сторону, т. е. возможен был бы сбой триггера. Однако присутствие форсирующих конденсаторов приводит к тому, что после окончания входного импульса (если он достаточно короткий) состояние всей схемы несимметричное. Несимметрия выражается в различии напряжений на конденсаторах $C1$ и $C2$ и приводит к тому, что процесс переключения развивается в нужном направлении.

Действительно, в исходном состоянии (транзистор $T1$ закрыт) конденсатор $C1$ заряжен почти до напряжения источника питания, а конденсатор $C2$ почти разряжен, так как напряжение на базе закрытого транзистора $T1$ много меньше по абсолютной величине, чем напряжение источника питания. За время действия входного импульса эти напряжения изменяются незначительно. Поэтому в первый момент после его окончания, когда оба транзистора еще закрыты, напряжение на конденсаторе $C1$ направлено встречно напряжению питания и ток через этот конденсатор в базу транзистора $T2$ не поступает. В то же время напряжение конденсатора $C2$ хоть и направлено также встречно напряжению питания, но меньше его. Поэтому в базу транзистора $T1$ начинает течь ток от источника питания. Это и приводит к открыванию транзистора $T1$, что в свою очередь вызывает разрядный ток от конденсатора $C1$, поддерживающий закрытое состояние транзистора $T2$. В результате триггер перебрасывается. С приходом следующего положительного импульса триггер перебрасывается в обратном направлении.

Таким образом, конденсаторы $C1$ и $C2$ служат как элементы памяти внутри триггера, «запоминая» его предшествующее состояние. Следует отметить, что длительность входного импульса должна быть небольшая, в ином случае за время его действия начальные напряжения на

конденсаторах могут значительно измениться и возможен сбой триггера. Другими словами, триггер со счетным входом критичен к длительности входных импульсов, а в общем случае и к их амплитуде.

Диаграмма выходного напряжения $U_{\text{вых2}}$ для режима счетного запуска также показана на рис. 1, в, из которого видно, что частота переключения триггера вдвое меньше частоты переключения задающего генератора. Таким образом, триггер со счетным входом как бы считает до двух, т. е. после поступления двух импульсов (например, 1 и 2 на рис. 1, в) и с приходом третьего, триггер возвращается в исходное состояние.

Триггер со счетным входом используют в счетчиках, пересчетных схемах, делителях частоты.

Оборудование и аппаратура

Электронный осциллограф с открытым входом С1-49 с измерением амплитуд сигналов от 20 мВ до 120 В и полосой частот от 0 до 5 мГц	1 шт.
Источник напряжения постоянного тока (Б5-7) 12 В, 100 мА	2 »
Транзисторы: $T1-T4$ (МП21Е)	4 »
Резисторы: $R1, R2, R7, R9, R10, R13$ и $R14$ (МЛТ-0,5-2,2 кОм)	7 »
$R3$ и $R4$ (МЛТ-0,5-22 кОм $\pm 5\%$)	2 »
$R5$ и $R6$ (МЛТ-0,5-180 кОм $\pm 5\%$)	2 »
$R11$ и $R12$ (МЛТ-0,5-12 кОм $\pm 5\%$)	2 »
$R8$ (СП-11-А-10 кОм)	1 »
Конденсаторы: $C1$ и $C2$ (КСО-5-6800 пФ $\pm 10\%$)	2 »
$C3$ (КСО-2-1200 пФ $\pm 10\%$)	1 »
$C3, C4$ и $C5$ (МБМ-160-0,05 мкФ $\pm 10\%$)	3 »
Полупроводниковые диоды: $D1-D4$ (Д9Е)	4 »
Галетный переключатель	1 »
Кнопки с нормально разомкнутым контактом	2 »

Порядок выполнения работы

1. Подключить к исследуемой схеме (см. рис. 1) стабилизаторы напряжения. Установить на выходе каждого стабилизатора напряжения 12 В. Включить осциллограф и подсоединить его открытый вход к выходу триггера.

2. Убедиться в работоспособности триггера. Для чего при разомкнутом положении переключателя $П1$ поочередным нажатием кнопок $Кн1$ и $Кн2$ (закорачивая поочередно базы и эмиттеры транзисторов) перебросить несколько раз из одного положения в другое исследуемый триггер. Этот способ часто используют на практике не только

для проверки триггеров, но и для обнаружения неисправного транзистора.

3. Проверить расчетным путем правильность выбора номинальных значений резисторов $R3$, $R4$, $R5$ и $R6$ в схеме триггера из условий насыщения и отсечки транзисторов, считая $\beta_{\min} = 15$, а $I_{к.о. \max} = 50$ мкА. Записать формулы, по которым произведена проверка, и полученные данные.

4. Снять на кальку осциллограммы напряжения запускающего генератора и выходных импульсов цепочки $C3$, $R8$ при разомкнутых переключателях $П1$ и $П2$. Измерить с помощью осциллографа, пользуясь калиброванной разверткой, частоту запускающих импульсов. Периодом считать интервал времени между двумя соседними импульсами одной полярности. Значения частоты записать на осциллограммах.

5. Определить порог срабатывания триггера в режиме раздельного запуска. Для чего разомкнуть переключатель $П2$, а переключатель $П1$ поставить в положение «Режим раздельного запуска». Изменяя амплитуду запускающих импульсов потенциометром $R8$, найти границу устойчивой работы триггера. Измерить с помощью осциллографа амплитуду импульсов той полярности, при которой она меньше. Это значение и будет порогом срабатывания.

6. Снять осциллограмму выходного напряжения триггера в режиме раздельного запуска и указать на ней значение частоты.

7. Определить порог срабатывания триггера в режиме счетного запуска, снять осциллограмму выходного напряжения и указать на ней режим запуска и частоту повторения.

8. Для режима счетного запуска убедиться в нарушении работы триггера при большой длительности запускающих импульсов, увеличивая ее, замыкая переключатель $П2$. Проконтролировать с помощью осциллографа увеличение длительности запускающих импульсов.

Содержание отчета

1. Наименование отчета.

2. Название и технические данные использованных измерительных приборов.

3. Схема исследуемого триггера совместно с генератором запускающих импульсов и указанием номинальных данных элементов.

4. Формулы, использованные в работе, и значения исходных, расчетных и экспериментально определенных параметров.

5. Осциллограммы исследуемых напряжений с указанием их частоты и режима снятия.

Контрольные вопросы

1. Какие требования предъявляют к триггеру?

2. Каким условиям должны отвечать параметры резисторов в схеме триггера?

3. Как поступают импульсы на транзисторы триггера в режиме счетного запуска?

4. Какой полярности должны быть импульсы, подаваемые на базу одного транзистора триггера, в режиме раздельного запуска?

5. Какую функцию выполняют форсирующие конденсаторы триггера в режиме счетного запуска?

6. В каком режиме запуска триггер критичен к длительности и амплитуде входных импульсов?

7. Какой режим запуска триггера чаще используют в счетно-решающих устройствах?

Работа № 31. ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИГГЕРА НА ТУННЕЛЬНОМ ДИОДЕ

Цель работы — ознакомиться с принципом работы статического триггера на туннельном диоде.

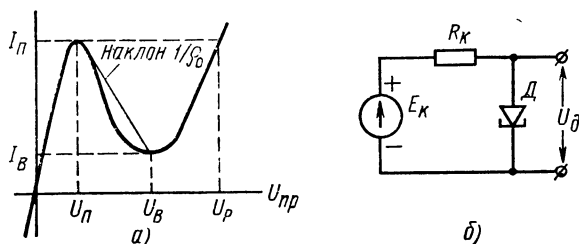


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика туннельного диода (а) и схема триггера на нем (б)

Пояснения. Туннельный диод — двухполюсный прибор, имеющий на прямой ветви вольт-амперной характеристики (рис. 1, а) участок с отрицательным сопротивлением. Вольт-амперная характеристика туннельного диода

имеет острый пик с координатами U_{π} и I_{π} и сравнительно тупую впадину с координатами $U_{\text{в}}$ и $I_{\text{в}}$. Участок характеристики левее пика называется первой восходящей ветвью, а правее впадины — второй восходящей ветвью. Между пиком и впадиной расположен участок с отрицательным сопротивлением, т. е. здесь увеличению напряжения на диоде соответствует уменьшение тока, и наоборот. Этот участок характеризуется средним значением отрицательного сопротивления

$$\rho_0 = (U_{\text{в}} - U_{\pi}) / (I_{\pi} - I_{\text{в}}).$$

Другим важным параметром туннельного диода является напряжение раствора характеристики $U_{\text{р}}$, соответствующее пиковому току и характеризующее вторую восходящую ветвь.

Туннельный диод обладает очень высоким быстродействием, намного большим, чем транзисторы.

Триггер на туннельном диоде, показанный на рис. 1, б, представляет собой последовательное соединение источника питания с напряжением $E_{\text{к}}$, нагрузочного резистора $R_{\text{к}}$ и туннельного диода D . По второму закону Кирхгофа для замкнутой цепи ток

$$I = E_{\text{к}} - U_{\text{д}} / R_{\text{к}}.$$

Это уравнение называется линией статической нагрузки. Точки пересечения линии статической нагрузки и вольт-амперной характеристики туннельного диода определяют возможные состояния схемы (рис. 2). Чтобы схема имела два устойчивых состояния, т. е. обладала свойствами триггера, необходимо иметь три точки — 1, 2, 3 пересечения линии статической нагрузки с вольт-амперной характеристикой диода. При $E_{\text{к}} > U_{\text{в}}$ для получения трех точек пересечения необходимо, чтобы

$$R_{\text{к.мин}} = E_{\text{к}} - U_{\pi} / I_{\pi} < R_{\text{к}} < E_{\text{к}} - U_{\text{в}} / I_{\text{в}} = R_{\text{к.макс}}. \quad (1)$$

При этом точка 2 характеризует неустойчивое состояние схемы, а точки 1 и 3 — устойчивые состояния.

Перевод схемы из состояния, характеризуемого точкой 1, осуществляется увеличением тока через диод, например повышением напряжения источника питания от значения $E_{\text{к}}$ до такого уровня, при котором ток через диод становится равным (чуть больше) тока I_{π} . Этому уровню соответствует верхняя пунктирная линия статической нагрузки, а состояние диода определяется точ-

кой A . Напряжение включения $U_{\text{вкл}}$, таким образом, определится из условия

$$U_{\text{вкл}} \geq U_{\text{п}} + I_{\text{п}} R_{\text{к}}. \quad (2)$$

По достижении уровня $U_{\text{вкл}}$ диод переключается (очень быстро) в состояние, определяемое точкой B . При снижении напряжения до первоначального уровня $E_{\text{к}}$ состояние диода определяется точкой $З$.

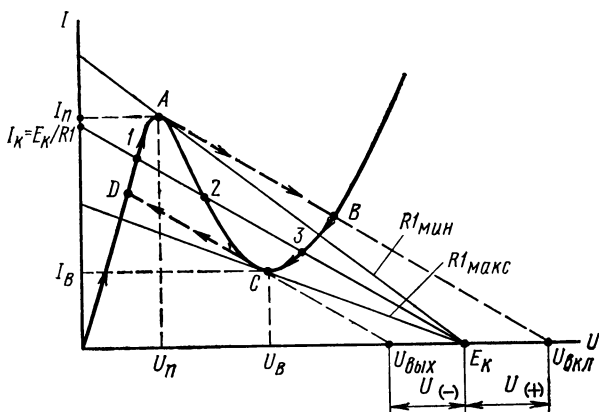


Рис. 2. Диаграммы работы триггера

Переключение схемы в обратном направлении (из состояния $З$ в состояние 1) осуществляется уменьшением напряжения источника питания от значения $E_{\text{к}}$ примерно до такого уровня $U_{\text{выкл}}$, при котором ток через диод равен току впадины $I_{\text{в}}$. Этому уровню соответствует нижняя пунктирная линия статической нагрузки, а состояние диода определяется точкой C . Напряжение выключения $U_{\text{выкл}}$, таким образом, можно найти из условия

$$U_{\text{выкл}} \leq U_{\text{в}} + I_{\text{в}} R_{\text{к}}. \quad (3)$$

По достижении уровня $U_{\text{выкл}}$ диод переключится в состояние, определяемое точкой D . При восстановлении напряжения до первоначального уровня $E_{\text{к}}$ диод вернется в состояние, определяемое точкой 1 .

Переключение триггера на туннельном диоде в практических схемах осуществляется подачей разнополярного импульсного напряжения, суммируемого с напряжением питания $E_{\text{к}}$, или подачей импульсов тока в диод.

Из условий (2), (3) и диаграммы работы триггера можно определить амплитуду положительного импульса включения и амплитуду отрицательного импульса выключения:

$$U(+)=U_{\text{вкл}}-E_{\text{к}}=U_{\text{п}}+I_{\text{п}}R_{\text{к}}-E_{\text{к}}, \quad (4)$$

$$U(-)=E_{\text{к}}-U_{\text{выкл}}=E_{\text{к}}-U_{\text{в}}-I_{\text{в}}R_{\text{к}}. \quad (5)$$

Отсюда видно, что для обеспечения равенства амплитуд импульсов включения и выключения напряжение питания должно быть равно

$$E_{\text{к}}=\frac{1}{2}[(U_{\text{п}}+U_{\text{в}})+R_{\text{к}}(I_{\text{п}}+I_{\text{в}})], \text{ когда } R_{\text{к}} > \rho_0.$$

К недостаткам триггеров на туннельных диодах относятся малая помехоустойчивость, малый перепад выходного напряжения и наличие непосредственной связи между цепями запуска и выхода, так как диод имеет только два вывода.

Оборудование и аппаратура

Миллиамперметр <i>mA</i> с пределом измерения 15 мА (М330 или прибор Ц4311)	1 шт.
Вольтметр <i>V1</i> с пределом измерения 15 В (М330 или прибор Ц4311)	1 »
Вольтметр <i>V2</i> с пределом измерения 1 В (М206 или прибор Ц4311)	1 »
Стабилизатор с регулируемым напряжением постоянного тока от 0 до 15 В при нагрузке до 30 мА (Б5-7)	1 »
Туннельный диод <i>D1</i> (ГИ305А или ГИ305Б)	1 »
Резистор МЛТ-0,5-1 кОм ±5%	1 »
Полупроводниковый стабилитрон <i>D2</i> (Д815Ж)	1 »

Порядок выполнения работы

1. Подключить к исследуемой схеме (рис. 3) стабилизатор напряжения и измерительные приборы. Стабилитрон *D2* необходим для предохранения схемы.

2. Определить экспериментальным путем ток и напряжение пика и впадины туннельного диода. Результаты измерений занести в табл. 1.

Для определения тока и напряжения пика следует, плавно увеличивая напряжение $E_{\text{к}}$ от 0, измерить ток и напряжение диода перед моментом резкого изменения состояния схемы. Операцию повторить три раза, уста-

Т а б л и ц а 1. Параметры туннельного диода ГИ305А

Паспортные данные				Экспериментальные данные				
$U_{\text{п}}, \text{В}$	$I_{\text{п}}, \text{мА}$	$U_{\text{в}}, \text{В}$	$I_{\text{в}}, \text{мА}$	λ	$U_{\text{п}}, \text{В}$	$I_{\text{п}}, \text{мА}$	$U_{\text{в}}, \text{В}$	$I_{\text{п}}, \text{мА}$
0,085	10	0,25	2	1 2 3				

навливая перед началом каждой напряжением $E_{\text{к}}$ на нулевой уровень. Для определения тока и напряжения впадины следует увеличением напряжения $E_{\text{к}}$ от 0 перебросить триггер во включенное состояние (через пик), а затем, постепенно уменьшая входное напряжение, измерить ток и напряжение перед моментом резкого уменьшения напряжения, т. е. перед моментом переключения триггера в обратном направлении. Окончив измерения, вычислить среднее значение измеренных параметров схемы.

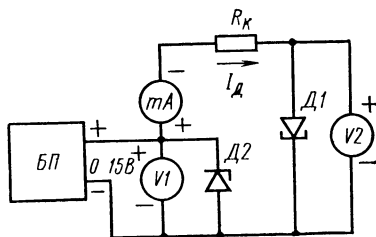


Рис. 3. Схема исследования триггера на туннельном диоде

3. Подтвердить расчетным путем по известным параметрам схемы и условию (1) правильность выбора номинального значения резистора $R_{\text{к}}$ для напряжения питания 6 В.

4. Рассчитать для напряжения питания $E_{\text{к}}$, указанного в табл. 2, и известным параметрам схемы напряжение включения и выключения триггера и требуемые амплитуды положительного и отрицательного запускающих импульсов напряжения. Для расчета использовать формулы (2) — (5)

5. Экспериментально определить напряжение включения и выключения триггера для напряжения питания, указанного в табл. 2. По определенным напряжениям включения и выключения и формулам (4) и (5) вычислить экспериментальные значения амплитуд запускающих импульсов.

Таблица 2. Напряжения включения и выключения триггера

$E_K = 4 \text{ В}$				$E_K = 6 \text{ В}$				
$U_{\text{вкл}}, \text{ В}$	$U_{\text{выкл}}, \text{ В}$	$U(+), \text{ В}$	$U(-), \text{ В}$	$U_{\text{вкл}}, \text{ В}$	$U_{\text{выкл}}, \text{ В}$	$U(+), \text{ В}$	$U(-), \text{ В}$	
								Расчет
								Эксперимент

Содержание отчета

1. Наименование отчета.
2. Название и технические данные использованных измерительных приборов.
3. Схема исследуемого триггера и диаграмма его работы.
4. Табл. 1 и 2 с расчетными и экспериментальными данными.
5. Формулы, использованные в работе, и значения расчетных параметров.

Контрольные вопросы

1. В каком включении используется туннельный диод в схеме триггера?
2. Сколько точек пересечения должна иметь линия статической нагрузки с вольт-амперной характеристикой туннельного диода, чтобы схема выполняла функции триггера?
3. Поясните принцип действия триггера на туннельном диоде по диаграмме его работы.

Работа № 32. ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ТРАНЗИСТОРАХ

Цель работы — ознакомиться с принципом действия и устройством логических элементов, выполняющих операции НЕ, ИЛИ, И.

Пояснения. Схемы элементов, выполняющих некоторые логические операции в двоичной системе счисления, показаны на рис. 1, где каждый транзистор работает как ключ. Поэтому каждый логический элемент в зависимо-

сти от состояния входных сигналов может находиться в двух состояниях.

Условимся считать более положительный уровень потенциала на входе или выходе логического элемента состоянием единица (1), а более отрицательный уровень — состоянием нуль (0). При этом изменение уровня вовсе не предполагает изменение знака потенциала или входного или выходного напряжения. Например, выходное на-

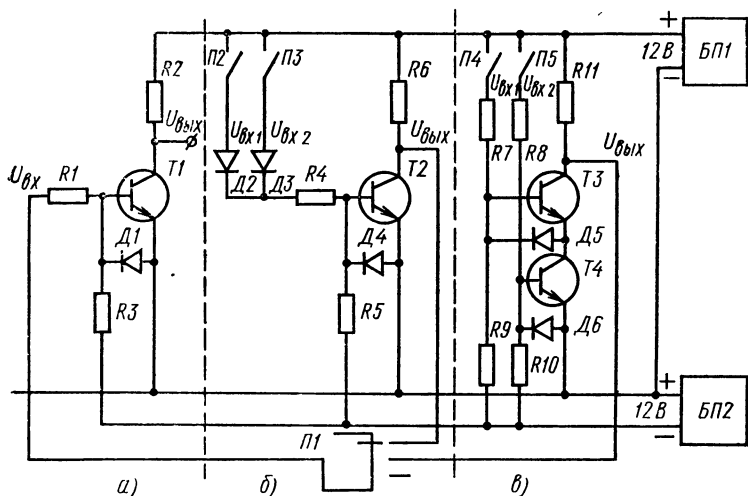


Рис. 1. Логические элементы, выполняющие логические операции: а — НЕ, б — ИЛИ/НЕ, в — И/НЕ

пряжение коллектор — эмиттер ключа на транзисторе обратной проводимости всегда положительное. Кроме того, входные и выходные напряжения каждого логического элемента должны иметь одинаковую полярность, чтобы обеспечить возможность совместной их работы в одной логической системе.

Прежде чем рассмотреть принцип действия и операции, выполняемые логическими элементами, остановимся на записи состояний простейших логических элементов. Соответствие условных состояний на входе и выходе логического элемента отрицания НЕ иллюстрируется таблицей, показанной на рис. 2, а, в первом столбце которой указаны состояния на входе элемента НЕ, а во втором — состояния на выходе. Из табл. 2, а следует, что при от-

существовании сигнала на входе логического элемента НЕ на его выходе есть сигнал, и наоборот.

Работа логического элемента суммирования ИЛИ отражена в таблице состояний, показанной на рис. 2, б. Здесь сигнал на выходе (1) появляется, когда есть сигнал на первом входе, или на втором входе, или на обоих входах.

Элемент логического умножения И характеризуется таблицей состояний, показанной на рис. 2, в. Здесь сигнал на выходе есть только тогда, когда есть сигнал на первом и втором входах одновременно.

U_{BX}	U_{BIX}
0	1
1	0

а)

U_{BX1}	U_{BX2}	U_{BIX}
0	0	0
1	0	1
0	1	1
1	1	1

б)

U_{BX1}	U_{BX2}	U_{BIX}
0	0	0
1	0	0
0	1	0
1	1	1

в)

Рис. 2. Таблицы состояний простейших логических элементов:
а — НЕ, б — ИЛИ, в — И

Рассмотрим логический элемент, показанный на рис. 1, а. В исходном состоянии, когда нет входного сигнала, транзистор $T1$ закрыт током от источника $E_{см}$ через резистор $R3$; на выходе элемента положительное напряжение, равное E_k . Поэтому при состоянии на входе «0», на выходе — «1». При подаче положительного входного напряжения транзистор $T1$ откроется. Отсюда, когда на входе состояние «1», на выходе «0». Следовательно, этот элемент выполняет логическую операцию НЕ (см. табл. на рис. 2, а).

Элемент, показанный на рис. 1, б, работает следующим образом. В исходном состоянии, когда нет ни одного входного сигнала, транзистор $T2$ закрыт и на выходе элемента положительное напряжение, равное E_k . Поэтому при состоянии «0» на обоих входах на выходе состояние «1». С появлением положительного напряжения на первом, на втором или на обоих входах транзистор открывается и выходное напряжение падает до нуля. Следовательно, состоянию «1» на любом входе или на обоих

входах соответствует состояние «0» на выходе. Таким образом, этот элемент имеет состояния, противоположные состоянию элемента ИЛИ (см. таблицу на рис. 2, б), т. е. он реализует логическую операцию ИЛИ/НЕ. В вычислительной технике эта операция носит название функции Пирса.

Элемент, показанный на рис. 1, в, когда нет входных сигналов, имеет на выходе напряжение E_k . Если поступает положительное напряжение на один из входов, открывается один транзистор ($T3$ или $T4$), а другой остается закрытым. Поэтому при состоянии «0» на обоих входах или, когда на одном входе состояние «0», а на другом «1», на выходе состояние «1». Выходное напряжение будет равно нулю только в том случае, когда открыты одновременно оба транзистора, т. е. когда на первом и втором входах положительные напряжения. Следовательно, когда на первом и на втором входах состояние «1», тогда на выходе состояние «0». Таким образом, этот элемент имеет состояния, противоположные элементу И (см. таблицу на рис. 2, в), т. е. он реализует логическую операцию И/НЕ. Эта операция носит название функции Шеффера.

Чтобы на элементах ИЛИ/НЕ и И/НЕ выполнить операции ИЛИ и И, надо к их выходам подключить элемент, реализующий операцию НЕ.

Оборудование и аппаратура

Вольтметр постоянного тока с пределом измерения 15 В (М330 или прибор Ц4311)	1 шт.
Стабилизатор напряжения постоянного тока с выходным напряжением 12 В при нагрузке 100 мА (Б5-7)	2 »
Транзисторы: $T1-T4$ (МП37Б)	4 »
Полупроводниковые диоды: $D1-D6$ (Д9Ж)	6 »
Резисторы: $R2, R6$ и $R11$ (МЛТ-0,5-2,2 кОм $\pm 5\%$) . . .	3 »
$R1, R4, R7$ и $R8$ (МЛТ-0,5-22 кОм $\pm 5\%$) . . .	4 »
$R3$ и $R5$ (МЛТ-0,5-180 кОм $\pm 5\%$)	2 »
$R9$ и $R10$ (МЛТ-0,5-120 кОм $\pm 5\%$)	2 »
Тумблеры $P2-P5$ (ТВ-2-1)	5 »
Галетный переключатель $P1$ на три положения . . .	1 »

Порядок выполнения работы

1. Подключить к исследуемым логическим элементам (см. рис. 1) стабилизаторы напряжения, установив на каждом из них напряжение 12 В. Разомкнуть переключач-

тели П2—П5, а переключатель П1 оставить в любом положении.

2. Составить таблицы состояний (табл. 1 и 2) элементов ИЛИ/НЕ и И/НЕ, анализируя их работу по схемам, показанным на рис. 1.

Т а б л и ц а 1. Состояния элемента ИЛИ/НЕ, полученные аналитически

$U_{вх1}$	$U_{вх2}$	$U_{вых}$
0	0	
1	0	
0	1	
1	1	

Т а б л и ц а 2. Состояния элемента И/НЕ, полученные аналитически

$U_{вх1}$	$U_{вх2}$	$U_{вых}$
0	0	
1	0	
0	1	
1	1	

Т а б л и ц а 3. Состояния элемента ИЛИ/НЕ, полученные экспериментально

$U_{вх1}$		$U_{вх2}$		$U_{вых}$	
услов. сост.	напряжение, В	услов. сост.	напряжение, В	услов. сост.	напряжение, В
0	0	0	0		
1	12	0	0		
0	0	1	12		
1	12	1	12		

3. Составить экспериментальные таблицы состояний элементов ИЛИ/НЕ и И/НЕ (табл. 3 и 4) и сравнить их с табл. 1 и 2.

Таблица 4. Состояния элемента И/НЕ, полученные экспериментально

$U_{вх1}$		$U_{вх2}$		$U_{вых}$	
услов. сост.	напряжение, В	услов. сост.	напряжение, В	услов. сост.	напряжение, В
0	0	0	0		
1	12	0	0		
0	0	1	12		
1	12	1	12		

Условные состояния «0» и «1» на входе элементов определяются соответственно разомкнутым и замкнутым положением тумблера, а на выходе соответствуют малому напряжению на открытом и большому напряжению на закрытом транзисторе. В графу «напряжение» заносят значения напряжения в вольтах на входах и выходах элементов в соответствующем состоянии, измеренные вольтметром.

4. Составить экспериментальные таблицы состояния элементов ИЛИ и И (табл. 5 и 6).

Таблица 5. Состояния элемента ИЛИ, полученные экспериментально

$U_{вх1}$		$U_{вх2}$		$U_{вых}$	
услов. сост.	напряжение, В	услов. сост.	напряжение, В	услов. сост.	напряжение, В

Таблица 6. Состояния элемента И, полученные экспериментально

$U_{вх1}$		$U_{вх2}$		$U_{вых}$	
услов. сост.	напряжение, В	услов. сост.	напряжение, В	услов. сост.	напряжение, В

Для определения состояний элемента ИЛИ подключить к выходу схемы ИЛИ/НЕ переключателем $П1$ элемент НЕ, а элемента И — переключателем $П1$ поставить в другое положение. Выходные напряжения контролировать и измерять на элементе НЕ вольтметром.

5. Сравнить состояния элементов ИЛИ и НЕ, записанные в табл. 5 и 6, с состояниями, приведенными в таблицах на рис. 2.

6. Составьте таблицу возможных условных состояний для элемента НЕ/НЕ.

Содержание отчета

1. Наименование отчета.
2. Название и технические данные использованных измерительных приборов.
3. Схемы исследованных элементов с указанием их номинальных данных.
4. Табл. 1—6 состояний исследованных элементов.

Контрольные вопросы

1. Какому требованию должны отвечать логические элементы, работающие в одной логической системе?
2. Когда появляется сигнал на выходе элемента И: когда на каком-нибудь входе есть сигнал или когда есть сигналы на всех входах?
3. Какое состояние должно быть на входе элемента НЕ, когда выходное состояние «0»: «1» или «0»?

Работа № 33. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕГИСТРА СДВИГА НА ТРАНЗИСТОРАХ

Цель работы — ознакомиться с назначением и принципом действия кольцевого регистра сдвига на статических триггерах.

Пояснения. Схема трехразрядного кольцевого регистра, предназначенного для оперативного хранения и сдвига в одну сторону информации (трехразрядного числа), которая вводится и считывается параллельно, показана на рис. 1. Триггеры $TГ1$, $TГ2$, $TГ3$ — составляющие этот трехразрядный регистр, симметричные, одинаковые. Поэтому элементы, выполняющие одну и ту же функцию в каждом триггере, имеют одинаковые обозначения. Кнопочные микропереключатели $П1$ и $П2$ с самовозвратом нормально разомкнутого контакта служат для установки триггеров в необходимые состояния, т. е. для записи числа в регистр. Кнопочный переключатель $П3$ с самовозвратом перекидного контакта служит для запуска генератора сдвигающего импульса $ГСИ$, выполненного на транзисторе ($T3$, $T4$) и эмиттерном повторителе $T5$.

Регистр замкнут в кольцо. Здесь его триггеры относительно друг друга включены последовательно, т. е. входы каждого последующего триггера (диоды $Д1$ и $Д2$) управляются от выходов каждого предыдущего триггера через резисторы $R7$ и $R8$. Причем для первого триггера $TГ1$ предыдущим считается третий триггер $TГ3$.

Условимся считать за «0» такое состояние триггера в регистре, при котором открыт его транзистор $T2$ и в нем записан 0, а за «1» — такое состояние, когда транзистор $T2$ закрыт, т. е. в триггере записана 1.

Пусть все триггеры находятся в состоянии «0». Тогда транзисторы $T1$ каждого триггера закрыты и конденсаторы $C2$ заряжены до напряжения коллектора закрытого транзистора $T1$ предшествующего триггера через резисторы $R7$. Следовательно, потенциал обкладки этих конденсаторов, соединенной с анодом диода, отрицателен относительно нуля схемы. Конденсаторы $C1$ при этом разряжены. При нажатии кнопки $П3$ триггер генератора $ГСИ$ переключится и его транзистор $T3$ откроется. В результате транзистор $T5$ эмиттерного повторителя закрывается и конденсатор $C3$ разряжается через резисторы $R11$, $R12$. Ток разряда создает на резисторе $R11$ положитель-

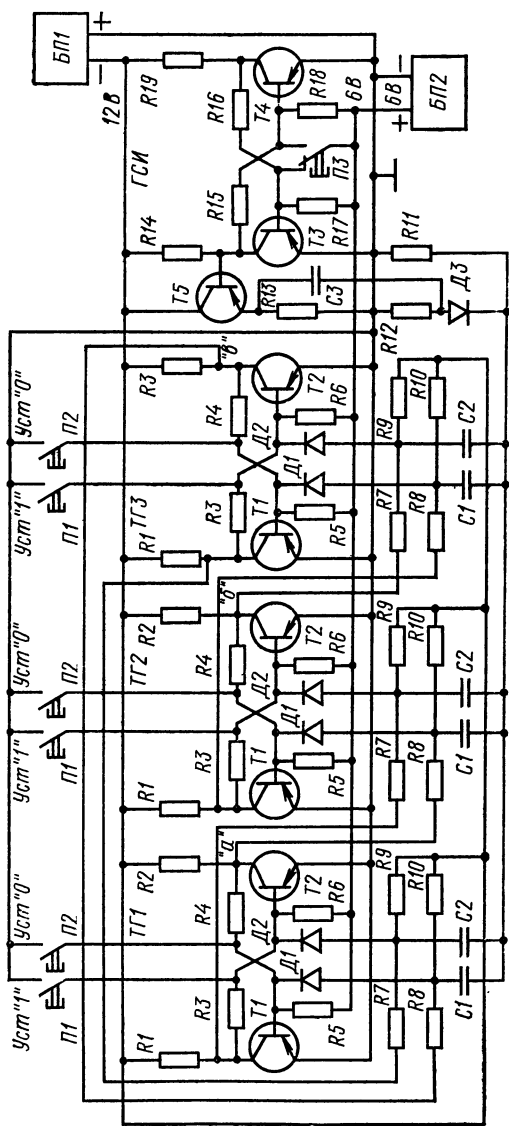


Рис. 1. Трехразрядный кольцевой регистр с генератором сдвигающего импульса

ный импульс напряжения (импульс сдвига), который поступает одновременно на все конденсаторы $C1$ и $C2$. Так как конденсаторы $C2$ заряжены и на аноде диодов $D2$ большое отрицательное напряжение, а конденсаторы $C1$ разряжены и на аноде диодов $D1$ напряжение, близкое к нулю, положительный импульс сдвига поступает только на базы транзисторов $T1$. В силу того что транзисторы $T1$ были закрыты, сдвигающий импульс не изменит состояние регистра, сброшенного в исходное состояние «0».

Если во втором триггере записана «1», а в первом и третьем «0», положительный сдвигающий импульс проходит через разряженные конденсаторы $C1$ на базы транзисторов $T1$ первого и второго триггеров и через разряженный конденсатор $C2$ третьего триггера на базу его транзистора $T2$. Следовательно, первый триггер останется в «0», второй перебросятся из «1» в «0», а третий перейдет из «0» в «1». С приходом второго запускаящего импульса уже первый триггер перебросятся в «1», а остальные — в «0». С приходом третьего запускаящего импульса

Двоичная система			Десятичная система
0	1	0	2
0	0	1	1
1	0	0	4
0	1	0	1

Рис. 2. Таблица состояний кольцевого регистра с исходным состоянием «010»

регистр займет

исходное состояние «010». Из анализа работы регистра видно, что с приходом сдвигающего импульса каждый триггер перебрасывается в то состояние, которое занимал предшествующий триггер до прихода сдвигающего импульса, что и требуется от регистра сдвига.

Изменение состояния кольцевого регистра можно проиллюстрировать таблицей состояний. Для случая, когда во второй триггер записана «1», а в первый и третий «0», т. е. в регистре записано число «010» в двоичной системе, что соответствует числу 2 в десятичной системе, таблица состояний показана на рис. 2. В левой части таблицы записаны состояния триггеров и регистра в двоичной системе, в правой части — состояние регистра в десятичной системе. Верхняя строчка таблицы соответствует исходному состоянию, а каждая следующая отражает изменения состояния с приходом импульса сдвига.

Оборудование и аппаратура

Вольтметры постоянного тока с пределом измерения 15 В (М330 или прибор Ц4311)	3 шт.
Стабилизатор напряжения постоянного тока с выходным напряжением 12 В при нагрузке до 100 мА	1 »
Стабилизатор напряжения постоянного тока с выходным напряжением 6 В при нагрузке до 20 мА Б5-7)	1 »
Транзисторы: $T1-T4$ (МП42А)	8 »
$T5$ (ГТ402В)	1 »
Диоды $D1-D3$ (Д9Д)	7 »
Конденсаторы: $C1$ и $C2$ (МБМ-160-0.05 мкФ $\pm 10\%$)	6 »
$C3$ (МБМ-160-0,5 мкФ $\pm 10\%$)	1 »
Резисторы: $R5, R6, R17$ и $R18$ (МЛТ-0,5—3,9 кОм $\pm 5\%$)	8 »
$R1-R4, R14-R16$ и $R19$ (МЛТ-1-820 Ом $\pm 5\%$)	16 »
$R7$ и $R8$ (МЛТ-0,5—3 кОм $\pm 5\%$)	8 »
$R9$ и $R10$ (МЛТ-0,5—100 кОм $\pm 5\%$)	6 »
$R11$ и $R12$ (МЛТ-0,5-2 кОм $\pm 5\%$)	2 »
$R13$ (МЛТ-0,5-200 Ом $\pm 5\%$)	1 »
Микропереключатели $П1-П3$ (МП-10) с самовозвратом перекидного контакта	7 »

Порядок выполнения работы

1. Подключить к исследуемому регистру (см. рис. 1). стабилизаторы напряжения, соблюдая указанную полярность и установив на одном стабилизаторе 12 В ($-E_K$), а на другом 6 В ($-E_{CM}$). К выходам триггеров ($a, б$ и $в$) подключить вольтметры.

2. Составить табл. 1—6 состояний регистра, анализируя работу схемы, для исходных чисел 001, 011, 100, 101, 110, 111, записанных в двоичной системе счисления.

Таблицы состояний кольцевого регистра для разных исходных чисел

Таблица 1

Двоичная система			Десятичная система
0	0	1	

Таблица 2

Двоичная система			Десятичная система
0	1	1	

Таблица 3

Двоичная система			Десятичная система
1	0	0	

Таблица 4

Двоичная система			Десятичная система
1	0	1	

Таблица 5

Двоичная система			Десятичная система
1	1	0	

Таблица 6

Двоичная система			Десятичная система
1	1	1	

Таблицы заполняют аналогично таблице, показанной на рис. 2.

3. Составить экспериментальные таблицы состояний регистра для исходных чисел, указанных в п. 2. Для составления экспериментальной таблицы состояний необходимо исходное число записать в регистр с помощью кнопочных микропереключателей. Состояние каждого триггера в регистре контролируют вольтметром, причем, если напряжение, показываемое вольтметром, лежит в пределах 4—10 В, это состояние «1». Для сдвига числа в регистре на один разряд следует нажать и отпустить кнопку запуска генератора сдвигающего импульса. Изменение состояния регистра также контролируют с помощью вольтметра. Таблицы состояний регистра выполняются аналогично таблицам п. 2.

4. Сравнить таблицы состояний регистра, составленные аналитически, с таблицами, составленными экспериментально.

Содержание отчета

1. Наименование отчета.
2. Название и технические данные использованных измерительных приборов.
3. Схема исследованного регистра с указанием номинальных данных.
4. Аналитические и экспериментальные таблицы состояний регистра.

Контрольные вопросы

1. Для чего служат регистры в вычислительных устройствах?
2. Каков путь прохождения сдвигающего импульса в исследуемой схеме?
3. Какое состояние занимает триггер с приходом сдвигающего импульса?
4. Сколько возможных состояний имеет исследуемый трехразрядный регистр?

Работа № 34. ИССЛЕДОВАНИЕ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ ДЕШИФРАТОРА И ПАРАЛЛЕЛЬНОГО СЧЕТЧИКА

Цель работы — ознакомиться с устройством и принципом действия двоичного диодного дешифратора матричного типа.

Пояснения. Дешифратор преобразует код числа, содержащегося в двоичном регистре или счетчике, в многоканальный единичный код. При этом каждому числу, записанному в счетчике, т. е. каждому его состоянию, соответствует появление напряжения на одном из выходных каналов (шин) дешифратора. Номер этого канала соответствует считываемому числу. Дешифратор должен иметь такое количество выходных каналов, которое равно числу возможных состояний счетчика. Для двоичного счетчика с числом разрядов n число возможных состояний $S = 2^n$.

Схема двоичного матричного дешифратора, работающего с двухразрядным счетчиком, показана на рис. 1. Каждая ячейка дешифратора представляет собой диодную схему совпадения (сборки), осуществляющую логическую операцию И (рис. 2). Из рис. 2 видно, что при отсутствии напряжений на обоих входах схемы или на одном из них, выходное напряжение ее близко к нулю и по-

является только тогда, когда и на первом, и втором входах есть отрицательные напряжения.

Двухразрядный счетчик (см. рис. 1) состоит из двух триггеров $ТГ1$ и $ТГ2$, соответствующих первому и второму разрядам записываемого числа.

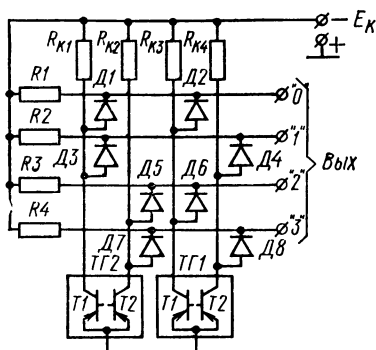


Рис. 1. Схема двоичного матричного дешифратора, работающего с двухразрядным счетчиком

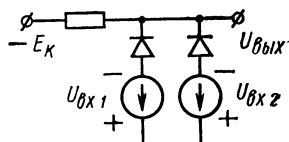


Рис. 2. Диодная схема совпадения

Число в счетчике	Состояние транзисторов в триггерах счетчика				Номер шины дешифра- тора
	ТГ1		ТГ2		
	Т1	Т2	Т1	Т2	
00	⚡1	0	⚡1	0	"0"
01	⚡1	0	0	⚡1	"1"
10	0	⚡1	⚡1	0	"2"
11	0	⚡	0	⚡1	"3"

Рис. 3. Таблица состояний двухразрядного счетчика, его триггеров и выходов дешифратора

Условимся считать за «0» такое состояние триггера, при котором открыт его правый транзистор $T2$, имеющий в этом состоянии близкий к нулю потенциал коллектора. Закрытому транзистору $T2$ соответствует состояние «1» триггера.

Установим оба триггера в состояние «0», что соответствует двоичному числу 00, записанному в счетчике. Что-

бы этому числу соответствовало появление напряжения на выходной шине дешифратора, обозначенной «0», соединим коллекторы транзисторов $T1$ обоих триггеров со входами логической схемы совпадения, собранной на резисторе $R1$ и диодах $D1$ и $D2$. Так как в состоянии счетчика «0» транзисторы $T1$ закрыты, т. е. на оба входа схе-

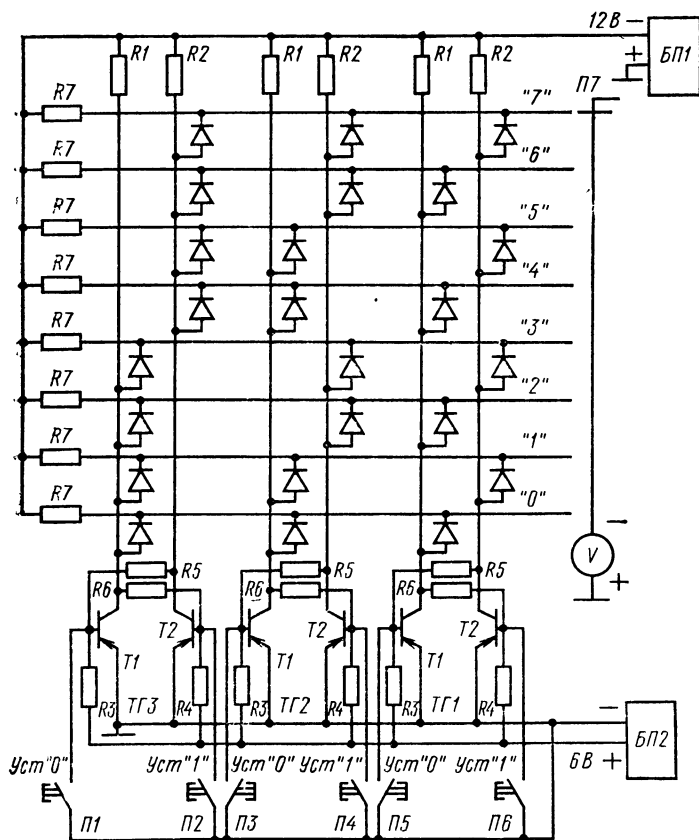


Рис. 4. Схема исследования двоичного матричного дешифратора, работающего с трехразрядным параллельным счетчиком

мы совпадения поданы напряжения, то на ее выходе — шине «0» также появляется напряжение.

Установим в счетчике число 01. Чтобы напряжение появилось на выходной шине дешифратора, обозначен-

ной «1», на логическую схему *R2, Д3, Д4* должны быть поданы напряжения с закрытых в этом состоянии транзисторов, т. е. с транзистора *T2* триггера *ТГ1* и транзистора *T1* триггера *ТГ2* и т. д. Таким образом, для каждого числа, записанного в двоичном счетчике, логическая схема, принадлежащая шине с номером, соответствующим этому числу, как бы собирает все закрытые транзисторы триггеров. Например, для числа 10, соответствующего шине с номером «2», схема совпадения *R3, Д5, Д6* собирает закрытые транзисторы *T1* триггера *ТГ1* и *T2* триггера *ТГ2*. Это правило можно проиллюстрировать таблицей состояний счетчика, его триггеров и выходов дешифратора, показанной на рис. 3, где в клетках, обведенных толстой линией, записаны состояния транзисторов *T2* триггеров, причем открытому транзистору *T2* (состояние «0» триггера) соответствует цифра 0, а закрытому транзистору *T2* — цифра «1». Сигналы на схемы совпадения дешифратора поступают с транзистора, против которого есть изображение диода.

На рис. 4 показана схема двоичного матричного дешифратора, работающего с трехразрядным счетчиком. Кнопочные микропереключатели *П1—П6* с самовозвратом нормально открытого контакта предназначены для записи кода числа в счетчик параллельного действия. Контролируют напряжения на выходных шинах дешифратора вольтметром *V*, подсоединяемым к шинам через переключатель *П7*.

Оборудование и аппаратура

Вольтметр <i>V</i> постоянного тока с пределом измерения 15 В (МЗ30 или прибор Ц4311)	1 шт.
Стабилизатор напряжения постоянного тока с выходным напряжением 12 В при нагрузке до 100 мА (Б5-7)	1 »
Стабилизатор напряжения постоянного тока с выходным напряжением 6 В при нагрузке до 20 мА (Б5-7)	1 »
Диоды Д9Д	24 »
Резисторы: <i>R1, R2, R5</i> и <i>R6</i> (МЛТ-0,5-820 Ом±5%)	12 »
<i>R3, R4</i> и <i>R7</i> (МЛТ-0,5-3,9 кОм±5%)	14 »
Микропереключатели <i>П1—П6</i> с самовозвратом нормально открытого контакта (МП-10)	6 »
Галетный переключатель <i>П7</i> на восемь положений	1 »
Транзисторы: <i>T1</i> и <i>T2</i> (МП21В)	6 »

Порядок выполнения работы

1. Заполнить для схемы, показанной на рис. 4, таблицу состояний трехразрядного счетчика, его триггеров и выходов дешифратора, показанную на рис. 5. Замкнутый транзистор $T2$ соответствует состоянию «1» триггера.

Число в счетчике	Состояние транзисторов в триггерах счетчика						Номер шины дешифра- тора
	ТГЗ		ТГ2		ТГ1		
	Т1	Т2	Т1	Т2	Т1	Т2	
000		0		0		0	"0"
001		0		0	0		"1"
010		0	0			0	"2"
							"3"
							"4"
							"5"
							"6"
							"7"

Рис. 5. Таблица состояний исследуемого трехразрядного счетчика, его триггеров и выходов дешифратора

2. Убедиться в правильности построения матричного дешифратора, показанного на рис. 4, взяв за исходные данные значения, полученные при составлении таблицы состояний по п. 1 рабочего задания.

3. Подключить к исследуемой схеме стабилизаторы напряжения, установив на одном из них 12 В, а на другом — 6 В. Подсоединить вольтметр.

4. Снять экспериментальную таблицу состояний трехразрядного счетчика, его триггеров и выходов дешифратора. Значения состояний записать в таблицу, аналогичную показанной на рис. 5. Запись числа в счетчик осуществляют с помощью переключателей П1—П6. Напряжение контролируют вольтметром V. Выходное напряжение возбужденной шины 4—6 В.

Содержание отчета

1. Наименование отчета.
2. Название и технические данные использованных измерительных приборов.
3. Схема двоичного матричного дешифратора, работающего с трехразрядным параллельным счетчиком.
4. Таблицы состояний счетчика и дешифратора, заполненные аналитическими и экспериментальными данными.

Контрольные вопросы

1. Сколько возможных состояний (чисел) имеет четырехразрядный двоичный счетчик?
2. Сколько выходных шин должно быть у матричного дешифратора, работающего с пятиразрядным двоичным счетчиком?
3. Какому числу в десятичной системе соответствует двоичное число 1010?
4. Какая логическая схема (И, НЕ, ИЛИ) используется в матричном дешифраторе?

ЛИТЕРАТУРА

Андреев Ф. Ф. Электронные устройства автоматики и их расчет. М., «Машиностроение», 1971.

Горюнов Н. Н. и др. Справочник по полупроводниковым приборам и интегральным схемам. М., «Энергия», 1972.

Глебович А. А. Лабораторные работы по электротехнике с основами промышленной электроники. М., «Высшая школа», 1976.

Гуревич Б. И., Иваненко Н. С. Справочник молодого рабочего по электронике. М., «Высшая школа», 1978.

Изюмов Н. М. Основы радиотехники. М., «Связь», 1965.

Лившиц Н. С., Телешевский Б. Е. Электро- и радиоизмерения. М., «Высшая школа», 1978.

Михайлов А. В. и др. Электронные вычислительные машины. М., «Статистика», 1971.

Мелешкина Л. П. и др. Руководство к лабораторным работам по основам промышленной электроники. М., «Высшая школа», 1967.

Смирнов Б. В. Лабораторно-практические занятия по курсам «Радиотехника и связь в сельском хозяйстве» и методика их проведения. М., «Высшая школа», 1965.

Пруслин З. М., Смирнова М. А. Радиоэлектроника. М., «Высшая школа», 1975.

Терентьев Б. П. Электропитание радиоустройств. М., «Связь», 1968.

Шкурин П. Г. Справочник по электро- и электронно-измерительным приборам. М. Воениздат, 1972.

Электроизмерительные приборы. Номенклатурный справочник. М., Отделение НТИ по приборостроению, средствам автоматизации и системам управления. Составители Эстеркин М. С., Праскунина К. В., Забродин В. В. 1965.

Гурлев Д. С. Справочник по электронным приборам. Киев, Государственное издательство технической литературы, 1962.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава первая. Методические указания по проведению лабораторных работ	5
Глава вторая. Электронные, ионные и полупроводниковые приборы	6
Работа № 1. Исследование полупроводниковых диодов	6
Работа № 2. Исследование вакуумного триода	11
Работа № 3. Исследование пентода	15
Работа № 4. Исследование транзистора	19
Работа № 5. Исследование полевого транзистора	23
Работа № 6. Исследование тиристора	28
Работа № 7. Исследование тиратрона	35
Работа № 8. Исследование фоторезистора	40
Глава третья. Выпрямители. Стабилизаторы	45
Работа № 9. Исследование одно- и двухполупериодного выпрямителей	45
Работа № 10. Исследование параметрического стабилизатора напряжения на стабилитроне	50
Работа № 11. Исследование компенсационного стабилизатора напряжения	55
Работа № 12. Исследование стабилизатора тока на транзисторе	60
Глава четвертая. Усилители	65
Работа № 13. Исследование одиночных усилительных каскадов на транзисторах	65
Работа № 14. Исследование усилительного каскада на электронной лампе	73
Работа № 15. Исследование одиночного каскада с общим эмиттером в ключевом режиме	78
Работа № 16. Исследование усилителя низкой частоты на транзисторах	86
Работа № 17. Исследование двухтактного усилителя мощности	93
Работа № 18. Исследование импульсного усилителя	98
Работа № 19. Исследование избирательного резистивного усилителя с двойным Т-образным мостом	103
Работа № 20. Исследование усилителя мощности постоянного тока	108
Глава пятая. Генераторы	113
Работа № 21. Исследование генератора синусоидального напряжения на RC -цепях*	113
Работа № 22. Исследование генератора синусоидального напряжения с LC -контуром	118
Работа № 23. Исследование мультивибраторов на транзисторах	121

Работа № 24. Исследование генератора пилообразного напряжения	126
Работа № 25. Исследование генератора прямоугольного напряжения на ферромагнитном сердечнике и транзисторах	130
Глава шестая. Радиоаппаратура	137
Работа № 26. Снятие и анализ резонансных кривых последовательного и параллельного колебательных контуров	137
Работа № 27. Исследование избирательного и полосового усилителей на основе резонансного каскада	144
Работа № 28. Исследование частотного детектора и амплитудного ограничителя	149
Работа № 29. Измерение основных параметров радиоприемников	154
Глава седьмая. Элементы вычислительной техники . . .	159
Работа № 30. Исследование триггера	159
Работа № 31. Исследование триггера на туннельном диоде	165
Работа № 32. Исследование основных логических элементов на транзисторах	170
Работа № 33. Исследование регистра сдвига на транзисторах	177
Работа № 34. Исследование совместной работы дешифратора и параллельного счетчика	182
Литература	188

Геннадий Борисович Толкачев

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ

Редактор А. Ш. Долгова. Художник Ф. Н. Буданов. Художественный редактор Т. В. Панина. Технический редактор Р. С. Родичева. Корректор Г. А. Четкина

ИБ № 1327

Изд. № ЭГ-287 Сдано в набор 28.06.77. Подп. в печать 15.03.78.
Формат 84×108¹/₃₂. Бум. тип. № 2. Гарнитура литературная Печать высокая. Объем 10,08 усл. печ. л. 9,34 уч.-изд. л. Тираж 25 000 экз.
Зак. № 3010. Цена 20 коп.

Издательство «Высшая школа»,
Москва, К-51, Неглинная ул., д. 29/14.

Московская типография № 8 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли,
Хохловский пер., 7.

ИЗДАТЕЛЬСТВО

«ВЫСШАЯ ШКОЛА»

**выпустит в свет в 1978 году
для мастеров производственного обучения
и для учащихся профессионально-технических училищ
следующие пособия:**

Минскер Е. Г. Производственное обучение сборщиков трансформаторов. Методическое пособие. 8 л. с ил. 27 коп.

Пособие содержит указания по организации производственного обучения при подготовке сборщиков трансформаторов в средних профессионально-технических училищах.

В нем даны указания по оборудованию учебных рабочих мест; изложена методика организации обучения на самостоятельных, выделенных для училища, участках производства и проведения занятий по каждому виду работ.

Пособие рекомендовано к изданию Государственным комитетом Совета Министров СССР по профтехобразованию и предназначено для мастеров производственного обучения средних профтехучилищ.

Моряков О. С. Производство корпусов полупроводниковых приборов. Учебник. Изд. 3-е, перераб. и доп. 10 л. с ил. 28 коп.

В книге описаны технологические процессы изготовления различных корпусов полупроводниковых приборов. Приведены краткие характеристики корпусов, основные методы получения спаев стекла и керамики с металлом, герметизации кристаллов с электронно-дырочными переходами пластмассой, а также способы нанесения гальванических покрытий и испытания корпусов.

Третье издание (2-е — в 1973 г.) дополнено описанием новых конструкций корпусов, сведениями об их расчете, более подробно и полно изложен технологический процесс изготовления керамических деталей.

Книга предназначена в качестве учебника для подготовки рабочих полупроводникового производства в профессионально-технических учебных заведениях и на производстве.

Шехмейстер Е. И., Вассерман Р. Н., Майзель Л. С. Технохимические работы в электровакуумном производстве. Учебник. Изд. 3-е, перераб. и доп. 20 л. с ил. 72 коп. В пер.

В книге дано описание назначения основных технохимических операций, применяемых в электровакуумном производстве, расска-

зано о конструкции применяемого оборудования, освещены причины появления брака в производстве электровакуумных приборов и методы его устранения.

Третье издание (2-е — в 1972 г.) книги переработано с учетом современных достижений в области технохимических работ, введен материал по перспективным направлениям технохимического производства.

Книга предназначена в качестве учебника для профессионально-технических учебных заведений.

Уважаемые читатели!

Издательство «Высшая школа» выпускает учебники, учебные и методические пособия, плакаты. Подробнее познакомиться с учебной литературой вам поможет аннотированный план на 1978 г. (профтехобразование), который имеется в книжных магазинах. Предварительные заказы на книги вы можете сделать в магазинах Книготорга или потребительской кооперации.

20 коп.