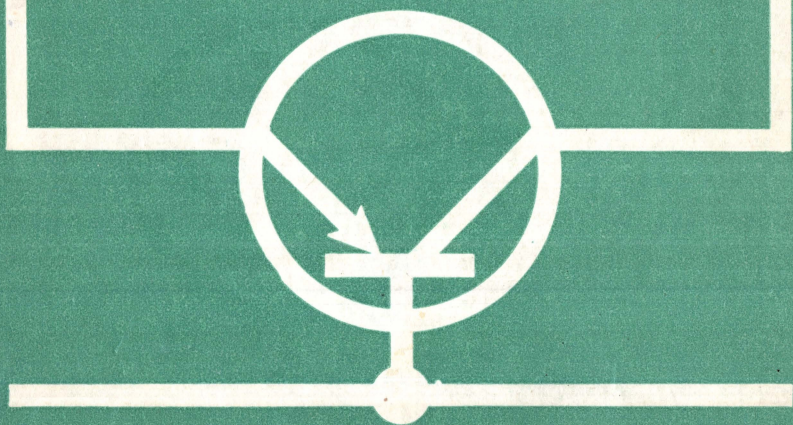


# ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

**ПО ОСНОВАМ  
ПРОМЫШЛЕННОЙ  
ЭЛЕКТРОНИКИ**



# **ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ**

## **ПО ОСНОВАМ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ**

**Под редакцией проф. В. Г. Герасимова**

**Допущено  
Министерством высшего и среднего  
специального образования СССР  
в качестве учебного пособия  
для студентов неэлектротехнических  
специальностей вузов**



**МОСКВА «ВЫСШАЯ ШКОЛА» 1977**

6Ф0.3

Л12

УДК 621.382(075)

В. Г. Герасимов, О. М. Князьков,  
А. Е. Краснопольский, А. Н. Матюхов,  
Ю. Я. Останин, А. Д. Покровский, Л. А. Чернов

Рецензенты:

кафедра общей электро-  
техники Новосибирского  
электротехнического ин-  
ститута

докт. техн. наук, проф.  
Б. Г. Меньшов (Москов-  
ский институт нефтех-  
мической и газовой про-  
мышленности им.  
И. М. Губкина)

**Лабораторные работы по основам промыш-**  
Л12 **ленной электроники. Учеб. пособие для втузов.**  
Под ред. В. Г. Герасимова. М., «Высш. шко-  
ла», 1977.

181 с. с ил.

На обороте тит. л. авт.: В. Г. Герасимов, О. М. Князь-  
ков, А. Е. Краснопольский (и др.).

Сборник содержит описание 14 лабораторных работ и ме-  
тодические указания по их выполнению. В работах исследуются  
полупроводниковые и электровакуумные приборы и устройства,  
а также интегральные микросхемы в объеме, предусмотренном  
программами курсов «Основы промышленной электроники» для  
неэлектротехнических специальностей втузов.

Л  $\frac{30407-428}{001(01)-77}$  115—77

6Ф0.3

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебными планами подготовки теплоэнергетиков, металлургов и инженеров некоторых технологических специальностей предусмотрено изучение курса «Промышленная электроника». Студенты остальных неэлектротехнических специальностей ВТУЗов изучают курс «Электротехника и основы электроники». И в том и в другом случае изучение теоретической части курса сопровождается выполнением лабораторных работ по электронике. Студенты большинства из этих специальностей выполняют 4—5 таких лабораторных работ, в отдельных случаях их число может составить 8—10.

Лабораторный практикум играет важную роль при изучении основ промышленной электроники. Лабораторные занятия дают студентам наглядное представление о работе электровакуумных и полупроводниковых приборов в устройствах промышленной электроники, об их свойствах, характеристиках и возможностях. Во время занятий студенты должны приобрести полезный для их будущей работы опыт использования современных электронных измерительных приборов, широко используемых в настоящее время в системах измерения и регулирования неэлектрических величин и многих технологических процессов.

В предлагаемом пособии, предназначенном для студентов указанных специальностей, приведено описание 14 лабораторных работ по основам промышленной электроники. Лабораторные работы составлены на основе опыта преподавания курса в Московском энергетическом институте. Перечень лабораторных работ, выполняемых студентами, должен составляться кафедрами в зависимости от специальности будущих инженеров.

Авторы надеются, что предлагаемый практикум окажется полезным не только студентам, но и преподавателям и окажет помощь при постановке лабораторных работ в других вузах страны. Авторы благодарят рецензентов — докт. техн. наук, проф. Б. Г. Меньшова и коллектив преподавателей кафедры общей электротехники Новосибирского электротехнического института, руководимый канд. техн. наук, доц. О. Н. Веселовским, а также сотрудников кафедры общей электротехники МЭИ за ценные замечания и советы.

Авторы понимают, что подготовленное пособие не лишено недостатков, и поэтому с благодарностью примут все пожелания и замечания, которые просят направлять по адресу: Москва, К-51, Неглинная ул., д. 29/14, изд-во «Высшая школа».

*Авторы*



## **ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

Промышленной электроникой называется отрасль науки и техники, изучающая принцип действия, устройство и характеристики электровакуумных и полупроводниковых приборов и применение их в устройствах, используемых в промышленности. В зависимости от области использования этих устройств промышленную электронику делят на *информационную, энергетическую и технологическую*.

В *информационной промышленной электронике* основное внимание уделяется получению, преобразованию и передаче информации о производственных процессах с целью осуществления контроля и управления. *Энергетическая промышленная электроника* связана с получением, преобразованием и передачей электрической энергии. *Технологическая промышленная электроника* охватывает круг вопросов, связанных с воздействием, оказываемым пучками электронов, ионов и квантов электромагнитного поля на вещество.

Все три направления промышленной электроники имеют важное значение для различных областей промышленности, для автоматизации производственных процессов.

Овладение материалом курса эффективно лишь в том случае, когда наряду с изучением теории студенты в условиях проведения лабораторного эксперимента знакомятся на практике с основными характеристиками электронных устройств. Данный лабораторный практикум содержит работы, относящиеся в основном к первым двум направлениям промышленной электроники, имеющим наибольшее отношение к большинству неэлектротехнических специальностей.

В ходе выполнения лабораторных работ студенты должны:

научиться читать схемы наиболее распространенных электронных устройств, различать условные обозначения основных электровакуумных и полупроводниковых приборов;

ознакомиться с устройством и внешним видом электровакуумных и полупроводниковых приборов интегральных микросхем и важнейших измерительных электронных устройств;

научиться определять экспериментально характеристики электровакуумных и полупроводниковых приборов, работать с электронными измерительными приборами, осциллографом, генератором и некоторыми другими устройствами;

получить представление о возможностях использования тех или иных электровакуумных и полупроводниковых приборов и устройств при решении определенных практических задач.

Учебное пособие составлено применительно к лаборатории основ промышленной электроники, рассчитанной на одну учебную группу. В ее состав входят 15 универсальных стендов, на каждом из которых могут выполняться все лабораторные работы. Лабораторные занятия проводятся «фронтальным методом», т. е. все студенты учебной группы выполняют одновременно одну и ту же работу.

Количество и перечень лабораторных работ, которые выполняются студентами в зависимости от специальности, зафиксированы в графиках проведения лабораторных занятий. В Московском энергетическом институте коллоквиум по проверке готовности студентов к выполнению лабораторной работы проводится в начале каждого занятия с помощью контролирующих машин «Экзаменатор МЭИ» типа К-54М. Преимущество фронтального метода состоит в том, что лабораторные работы выполняются после соответствующих лекций.

Приведенные в данной книге теоретические сведения охватывают минимум материала, необходимый для подготовки и выполнения лабораторной работы.

Подготовка к лабораторной работе предусматривает изучение теоретического материала, а также выполнение расчетно-графической части задания. Задания включают расчет параметров и режимов работы электронных уст-

ройств, исследуемых в лаборатории. Результаты выполнения задания заносятся в бланк отчета, состоящий из титульного листа, схем электронных цепей и устройств, исследуемых в работе, таблиц для результатов измерений. В бланке отчета должно быть предусмотрено место для графиков экспериментально полученных зависимостей и перечня использованных в работе приборов.

На титульном листе должны быть указаны наименование кафедры, название работы, фамилия студента и его группа, этапы выполнения работы: «Коллоквиум сдан», «Работа выполнена», «Работа защищена». После выполнения каждого этапа около соответствующих слов ставится подпись преподавателя.

Хорошая подготовка к лабораторной работе — непременное условие ее эффективности, так как проведение любого эксперимента имеет смысл только в том случае, если экспериментатор отчетливо представляет себе цель эксперимента и характер ожидаемых результатов.

**Общие правила выполнения экспериментальной работы.** Перед выполнением работы в лаборатории необходимо внимательно ознакомиться с измерительными приборами, установленными на стенде, и с объектами исследования, смонтированными на съемной испытательной панели, предназначенной для данной работы. Перед началом работы все регуляторы и делители напряжения, регулировочные резисторы и устройства должны быть поставлены в положения, обеспечивающие минимальные токи и напряжения.

Прежде чем производить запись результатов измерений, необходимо определить диапазон измеряемых величин, количество измерений и наметить значения, которые будут устанавливаться для независимой переменной. Количество этих значений зависит от характера снимаемых зависимостей. Для плавных монотонных зависимостей достаточно 5—6 значений независимой переменной, равномерно распределенных по всему диапазону ее изменения. При снятии зависимостей, имеющих резкие экстремумы, как, например, у резонансных кривых, количество экспериментальных значений измеряемых величин в окрестностях особых точек должно быть больше, что позволит получить наиболее достоверную зависимость.

Поскольку в лаборатории используются универсальные стенды, на которых расположены многопредельные приборы, обеспечивающие выполнение всех лаборатор-

ных работ, перед началом выполнения каждого пункта рабочего задания необходимо выбрать нужный для данного эксперимента прибор и соответствующие пределы измерения. Результаты измерений необходимо заносить в заготовленные дома таблицы в виде делений, отсчитанных по прибору. В таблицах должны быть предусмотренны колонки для результатов измерений, пересчитанных в единицы измеряемых величин (вольты, милливольты, миллиамперы и т. д.). Эти колонки заполняются после проведения определенной серии измерений. Все измерения, относящиеся к одному режиму работы электронного устройства, должны проводиться без перерыва, за короткий промежуток времени, чтобы избежать погрешностей в измерениях, обусловленных различными факторами, например нагревом электронного устройства. При проведении большинства экспериментов одним из основных режимов работы электронного устройства является номинальный режим, поэтому измерение электрических величин при номинальном режиме для большинства лабораторных работ крайне необходимо. Электровакуумные и полупроводниковые приборы характеризуются рядом максимально допустимых параметров, превышение которых при проведении эксперимента недопустимо.

При построении некоторых характеристик, например амплитудно-частотной, часто пользуются логарифмической шкалой для частот, откладываемых по оси абсцисс. В этом случае измерения, проводимые в широком диапазоне частот, следует осуществлять на частотах, кратных 1, 2 и 5, т. е. при  $f_i = 20, 50, 100, 200, 500$  Гц и т. д.

После снятия зависимостей, относящихся к данной серии измерений (выполнение определенного пункта задания), необходимо построить соответствующие кривые зависимости (характеристики) и показать их преподавателю. После выполнения лабораторной работы титульный лист отчета возле слов «Работа выполнена» следует подписать у преподавателя. После этого можно разобрать электрические цепи и отключить измерительные приборы.

## **ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ**

### **ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

На лабораторном стенде имеются разъемы и вводные клеммы, электронные измерительные приборы и другие элементы цепи, которые при выполнении лабораторной работы могут находиться под напряжением. Поэтому

согласно «Правилам техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителем» такие стенды считаются действующими электроустановками и для их эксплуатации необходимо знать и строго соблюдать следующие правила техники безопасности:

1. Лабораторную работу можно выполнять только на исправном стенде.

2. Выполнять лабораторную работу на одном стенде должны не менее двух человек одновременно.

3. Перед началом работы на стенде необходимо убедиться, что все выключатели стенда находятся в положении «Выключено».

4. При сборке электрических цепей особое внимание следует обратить на исправность изоляции соединительных проводов, наличие изолирующих держателей на штырях. Об обнаруженных неисправностях необходимо сообщить лаборанту.

5. Категорически запрещается включать стенд без разрешения преподавателя.

6. При проведении опытов на испытательной панели стенда, находящейся под напряжением, все переключения и регулировки с помощью переключателей и переменных резисторов, включение и выключение тумблеров и тому подобные операции должны производиться одним человеком и только одной рукой. Вторая рука должна быть свободной и не должна касаться аппаратуры стенда.

7. На испытательной панели стенда, находящейся под напряжением, запрещается производить какие-либо переключения при помощи соединительных проводов. Перед любым изменением исследуемой цепи испытательная панель должна быть обесточена. Для этого соответствующие выключатели должны быть поставлены в положение «Выключено».

8. При проведении опытов с использованием электронных приборов (генератора, осциллографа, электронного вольтметра и т. п.) необходимо остерегаться одновременного касания руками, карандашами и другими предметами испытательной панели, находящейся под напряжением, и корпуса прибора, соединенного с клеммой прибора « $\perp$ ».

При использовании на опыте нескольких электронных приборов одновременно необходимо корпуса приборов соединить между собой через эти клеммы.

9. При обнаружении каких-либо повреждений или неисправностей электрического оборудования стенда или испытательной панели, а также при появлении дыма, искрения или специфического запаха перегретой изоляции необходимо немедленно обесточить стенд и сообщить об этом преподавателю или лаборанту.

10. В случае поражения человека электрическим током следует немедленно обесточить стенд, выключив питание стенда. В случае, когда отключение напряжения не может быть произведено быстро, нужно принять меры к отделению пострадавшего от частей оборудования, находящихся под напряжением. Для этого необходимо воспользоваться резиновыми перчатками, резиновым ковриком, а при их отсутствии можно применять такие подручные средства, как сухая одежда, сухие доски, палки и другие хорошие изоляторы.

11. При потере сознания и дыхания необходимо освободить пострадавшего от стесняющей одежды и делать искусственное дыхание до прибытия врача.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫХ ПРИБОРОВ И УСИЛИТЕЛЕЙ**

**Цель работы:** изучение принципа действия, исследование основных характеристик электронных электровакуумных приборов и двухкаскадного усилителя с резистивно-емкостной связью.

#### **КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ**

Электровакуумным прибором называют прибор, в котором рабочее пространство, изолированное газонепроницаемой оболочкой, имеет высокую степень разрежения или заполнено специальной средой (парами или газами). Действие электровакуумного прибора основано на использовании электрических явлений в вакууме или газе. Электровакуумные приборы подразделяются на электронные и ионные приборы.

Электронным электровакуумным прибором называется прибор, в котором прохождение электрического тока в рабочем пространстве с высоким разрежением осуществляется только свободными электронами.

В данной работе исследуются электронные приборы, применяемые для усиления электрических сигналов. Такие приборы называют *электронными усилительными лампами*.

Работа всех электронных электровакуумных приборов основана на *термоэлектронной эмиссии*, т. е. явлении выхода электронов из



металла или полупроводника в результате их нагрева. Термоэлектронная эмиссия осуществляется чаще всего за счет подогрева катода нитью накала. Простейшая электронная усилительная лампа, называемая *триодом*, имеет три электрода: катод, анод и сетку (рис. 1.1).

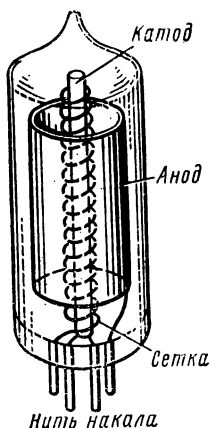
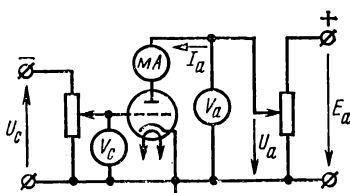


Рис. 1.1. Устройство электронного электровакуумного триода

Рис. 1.2. Схема включения триода для снятия анодных и анодно-сеточных характеристик



Эмиттируемые нагретым катодом электроны под действием приложенного анодного напряжения  $U_a$  (рис. 1.2), создаваемого источником э. д. с.  $E_a$ , движутся от катода к аноду. В результате во внешней цепи триода возникает анодный ток  $I_a$ .

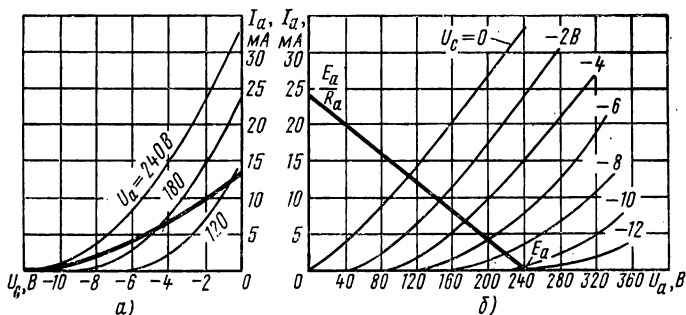


Рис. 1.3. Семейство анодно-сеточных (а) и анодных (б) характеристик триода

Влияние на анодный ток указанных напряжений можно оценить по двум семействам характеристик, которые можно определить с помощью приборов, включенных в цепь согласно рис. 1.2, по:

1) анодно-сеточным характеристикам  $I_a = f(U_c)$ , определяемым при  $U_a = \text{const}$ ;

2) анодным характеристикам  $I_a = f(U_a)$ , определяемым при  $U_c = \text{const}$ .

Типичный пример таких характеристик показан на рис. 1.3. Приведенные характеристики справедливы для простейшего, *статического режима* работы электронных ламп. При этом режиме на все электроды подаются только постоянные потенциалы и в анодной цепи не содержится никаких элементов, кроме источника напряжения. В отличие от статического режима работы электронного прибора при *динамическом режиме* в анодную цепь включают обычно резистор.

К основным параметрам электронной усилительной лампы, определяющим особенности ее работы, относятся:

1) внутреннее сопротивление

$$R_i = dU_a/dI_a \text{ при } U_c = \text{const}; \quad (1.1)$$

2) крутизна анодно-сеточной характеристики

$$S = dI_a/dU_c \text{ при } U_a = \text{const}; \quad (1.2)$$

3) статический коэффициент усиления

$$\mu = |dU_a/dU_c| \text{ при } I_a = \text{const}. \quad (1.3)$$

Так как анодные и анодно-сеточные характеристики нелинейны, то основные параметры относятся лишь к окрестности определенной точки характеристики, в пределах которой ее можно считать линейной.

Основные параметры электронной усилительной лампы связаны между собой простым соотношением

$$\mu = R_i S. \quad (1.4)$$

Внутреннее сопротивление в электровакуумных приборах измеряется обычно в килоомах, крутизна — в миллиамперах, отнесенных к вольту, статический коэффициент усиления — величина безразмерная.

В зависимости от типа триода и рабочего режима внутреннее сопротивление лампы обычно колеблется в пределах от 0,1 до 100 кОм, крутизна характеристики лежит в диапазоне от 0,2 до 45 мА/В, а коэффициент усиления обычно не превышает 100.

Триод может использоваться как в усилителях, так и генераторах сигналов. Однако он обладает рядом существенных недостатков, ограничивающих область его применения. К их числу следует отнести, во-первых, сравнительно небольшой статический коэффициент усиления ( $\mu \leq 100$ ). Во-вторых, помимо основного канала взаимодействия входной и выходной цепей через сам электронный прибор существует и дополнительный, обусловленный конечной величиной емкости между электродами (рис. 1.4). Особо существенную роль играет емкость между сеткой и анодом  $C_{ca}$ , называемая проходной, из-за которой в области высоких частот возникает паразитная связь между выходной (анодной) и входной (сеточной) цепями, что приводит к серьезным нарушениям в работе усилителя.

Указанный недостаток устраняется, например, в *пентоде*, который является многоэлектродной усилительной лампой и помимо катода  $K$ , анода  $A$  и управляющей сетки  $C_1$  имеет экранирующую  $C_2$  и

защитную  $C_3$  сетки (рис. 1.5). На сетку  $C_2$  подается положительный потенциал, а сетка  $C_3$  часто соединяется с катодом.

Благодаря дополнительным сеткам, введенным в промежуток анод — управляющая сетка, анодное напряжение очень мало влияет на анодный ток, поэтому величины статического коэффициента усиления и внутреннего сопротивления пентода значительно больше,

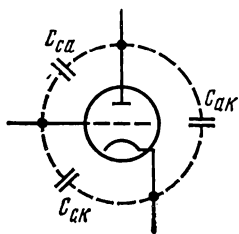


Рис. 1.4. Междуэлектродные емкости в триоде

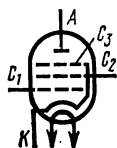


Рис. 1.5. Условное графическое изображение пентода

чем у триода. Проходная емкость  $C_{ca}$  у пентодов примерно на два порядка меньше, чем у триодов, и составляет обычно сотые доли пикофарады. Анодно-сеточные и анодные характеристики пентода (рис. 1.6) определяются при неизменных потенциалах экранирующей

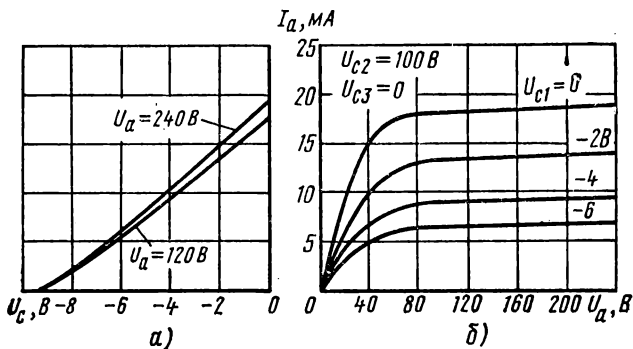


Рис. 1.6. Семейство анодно-сеточных (а) и анодных (б) характеристик пентода

и защитной сеток. Внутреннее сопротивление, крутизна и статический коэффициент усиления пентода обычно имеют соответственно следующий порядок:  $10 \div 1500$  кОм,  $0,5 \div 60$  мА/В, до 2500.

На рис. 1.7 изображена простейшая схема усилителя на триоде. Последовательно с лампой и источником питания  $E_a$  включается резистор  $R_a$ . Анодный ток в этом случае определяется не только свойствами лампы, но и величиной сопротивления резистора  $R_a$ . Источник

э. д. с.  $E_c$ , включенный в сеточную цепь вместе с резистором  $R_c$ , обеспечивает отрицательное напряжение между управляющей сеткой и катодом  $U_{co}$ , которое называют напряжением смещения. Это напряжение необходимо для работы усилителя без сеточных токов, которые могут привести к искажению формы усиливаемого сигнала.

Включение в анодную цепь резистора  $R_a$  приводит к тому, что анодное напряжение  $U_a$  триода становится меньше э. д. с.  $E_a$  и будет зависеть от анодного тока  $I_a$ :

$$U_a = E_a - R_a I_a. \quad (1.5)$$

Характеристики и параметры, определенные при включенном в анодную цепь резисторе  $R_a$ , называют динамическими.

При подготовке к лабораторной работе необходимо построить *динамическую анодно-сеточную характеристику*, которую чаще называют просто динамической. Эта характеристика позволяет проанализировать работу усилителя. С этой целью на семействе анодных характеристик (см. рис. 1.3, б) проводится прямая, называемая линией нагрузки. Эта прямая строится по уравнению (1.5).

Точки пересечения линий нагрузки с анодными характеристиками при различных значениях сеточного напряжения позволяют построить зависимость анодного тока от сеточного напряжения при наличии резистора  $R_a$  в анодной цепи, т. е. динамическую характеристику (жирная линия на рис. 1.3, а). Имея динамическую характеристику, можно, исходя из требований, предъявляемых к усилителям, определить начальный режим его работы при  $u_{вх}=0$  (*режим покоя*). Одно из основных требований к усилителям напряжения состоит в получении минимальных искажений, вносимых усилителем в усиливаемый сигнал.

Амплитудные искажения, обусловленные главным образом нелинейностью динамической характеристики усилительной лампы, могут быть уменьшены за счет оптимального выбора положения рабочей точки покоя, которая при максимальном по амплитуде сигнале должна находиться на середине линейного участка динамической характеристики. Амплитуда максимального линейно усиливаемого сигнала в этом случае будет равна половине значения сеточного напряжения, соответствующего линейному участку.

При таком выборе положения рабочей точки покоя и ограничении амплитуды усиливаемого сигнала усилительную лампу можно заменить некоторой эквивалентной линейной схемой, состоящей из источника э. д. с. величиной  $\mu u_{вх}$  и резистивного элемента с сопротивлением, равным внутреннему сопротивлению лампы  $R_i$ .

Величина коэффициента усиления усилительного каскада на триоде и пентоде определяется как

$$K = \mu / (1 + R_i R_a). \quad (1.6)$$

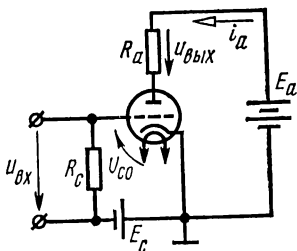


Рис. 1.7. Простейшая схема усилителя на триоде

Сопротивление  $R_a$  для усилителей на триоде выбирается обычно исходя из соотношения  $R_a = (2 \div 4) R_i$ . Для усилителей на пентоде  $R_a \ll R_i$  (обычно  $R_a \approx 0,1 R_i$ ), поэтому выражение для коэффициента усиления (1.6) упрощается и принимает вид

$$K \approx \mu R_a / R_i = S R_a, \quad (1.6')$$

где  $S$  — крутизна характеристики пентода.

В электронных устройствах часто используются комбинированные электронные лампы, содержащие две или более системы электродов в одном баллоне (двойной триод, триод-пентод, двойной тетрод и т. п.).

Для получения высокого коэффициента усиления усилителя часто с помощью комбинированных ламп создают многокаскадные усилители. Наиболее распространенным типом широкополосного много-

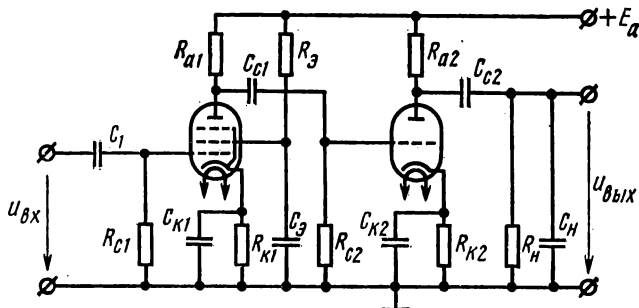


Рис. 1.8. Принципиальная электрическая схема 2-каскадного усилителя с  $RC$ -связью

каскадного усилителя переменного напряжения является *усилитель с резистивно-емкостной связью*, который для краткости называют усилителем с  $RC$ -связью. Эти усилители могут использоваться в широком диапазоне частот, вплоть до нескольких десятков мегагерц.

В лабораторной работе исследуется двухкаскадный усилитель с  $RC$ -связью, схема которого изображена на рис. 1.8. Первый каскад собран на половине лампы 6Ф1П, представляющей собой пентод, а второй каскад на другой половине лампы — триоде. В табл. 1.1 задания приведены электрические параметры триодной и пентодной частей этой лампы.

В каскадах усилителя отрицательное сеточное напряжение смещения  $U_{с0}$ , при котором сеточные токи практически отсутствуют, создается звеном автоматического смещения  $R_K C_K$  за счет падения напряжения от постоянной составляющей анодного тока  $I_{a0}$  на резисторе  $R_K$ . При этом потенциал катода становится больше потенциала корпуса усилителя. Ввиду того что сеточный ток в электронных лампах чрезвычайно мал, потенциал сетки при отсутствии входного напряжения практически равен потенциалу корпуса. Так как напряжением смещения  $U_{с0}$  является разность потенциалов между сеткой и катодом лампы, то  $U_{с0}$  в данном усилителе будет иметь отрицательную величину. При наличии входного напряжения для устране-

ния воздействия падения напряжения на резисторе  $R_k$  от переменной составляющей анодного тока на входное напряжение, в результате чего коэффициент усиления усилителя уменьшается, параллельно  $R_k$  включается конденсатор  $C_k$ . Сопротивление этого конденсатора на самой низкой частоте входного напряжения  $\omega_n$  должно удовлетворять условию

$$x_{Ck} \leq R_k / (10 \div 20).$$

Резистор  $R_a$  в первом каскаде необходим для создания определенного потенциала на экранирующей сетке, который обеспечивается падением напряжения на  $R_a$  от тока  $I_{c2}$ . Конденсатор  $C_a$  предназначен для уменьшения пульсаций экранирующего напряжения, возникающих из-за переменной составляющей тока экранирующей сетки. Связь каскадов осуществляется через разделительный конденсатор (конденсатор связи)  $C_c$ . Этот конденсатор пропускает на вход второго каскада лишь переменную составляющую анодного напряжения, представляющую собой выходное напряжение первого каскада.

Основные характеристики усилителя — амплитудная и амплитудно-частотная (или частотная).

*Амплитудная характеристика*  $U_{вых} = f(U_{вх})$  усилителя (рис. 1.9) определяется динамической характеристикой электронной лампы и при малых значениях входного напряжения является линейной.

*Частотная характеристика* (рис. 1.10) представляет собой зависимость коэффициента усиления усилителя от частоты. Эта зависимость определяется влиянием конденсатора связи  $C_c$  и междуэлектродных емкостей электронной лампы.

На рис. 1.11 представлена *схема замещения* выходной цепи усилительного каскада усилителя с  $RC$ -связью для переменных составляющих токов и напряжений. В схеме замещения электронная лампа, используемая в усилительном каскаде, заменена источником сигнала  $\mu U_{вх}$  с внутренним сопротивлением  $R_i$ . В этой схеме отсутствуют элементы звена автоматического смещения, так как переменная составляющая анодного тока создает на этих элементах весьма малое падение напряжения.

В усилительном каскаде выходное напряжение снимается с резистора  $R_a$  и подается на цепочку  $C_c R_c$ , что и показано на схеме замещения. Параллельно  $R_c$  включен емкостной элемент с эквивалентной емкостью  $C_0$ , учитывающей влияние монтажной и междуэлектродных емкостей:

$$C_0 = C_{ак1} + C_{ск2} + C_{с22}(1 + K_2) + C_m,$$

где  $C_{ак1}$  — междуэлектродная емкость промежутка анод — катод первой лампы;  $C_{ск2}$  — междуэлектродная емкость промежутка сетка — катод второй лампы;  $C_{с22}$  — междуэлектродная емкость промежутка сетка — анод второй лампы;  $K_2$  — коэффициент усиления второго каскада усилителя;  $C_m$  — монтажная емкость.

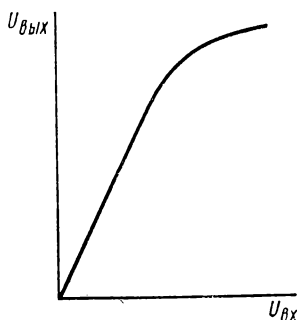


Рис. 1.9. Амплитудная характеристика усилителя



Уменьшение коэффициента усиления на низких частотах обусловлено увеличением сопротивления конденсатора  $C_c$ , что приводит к уменьшению выходного напряжения. Снижение коэффициента усиления усилителя на высоких частотах объясняется шунтирующим действием емкостного элемента с эквивалентной емкостью  $C_0$ , сопротивление которого с увеличением частоты уменьшается. Коэффициент усиления в области низших ( $f \leq f_H$ )  $K_H$  и высших ( $f \geq f_B$ )  $K_B$  частот определяют через коэффициент частотных искажений (см. рис. 1.10): для низших частот  $M_H = K_0/K_H$ , для высших частот  $M_B = K_0/K_B$ .

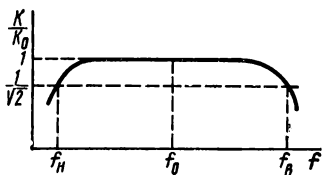


Рис. 1.10. Амплитудно-частотная характеристика усилителя с  $RC$ -связью

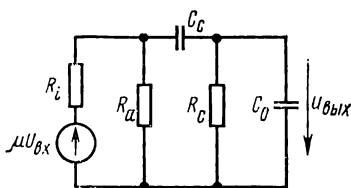


Рис. 1.11. Схема замещения усилительного каскада усилителя с  $RC$ -связью

В усилителях с  $RC$ -связью допустимые частотные искажения в зависимости от предъявляемых к усилителям требований устанавливаются в диапазоне от 1,02 до 1,5. Очень часто коэффициент частотных искажений принимается равным  $\sqrt{2} \approx 1,4$ . Диапазон частот  $f_H \div f_B$ , в пределах которого изменение коэффициента усиления усилителя не превышает коэффициент частотных искажений, называют *полосой пропускания*.

## ОПИСАНИЕ ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ ПАНЕЛИ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Испытательная панель изображена на рис. 1.12. Все элементы исследуемого двухкаскадного усилителя установлены на испытательной панели и соединены между собой в соответствии со схемой рис. 1.8. Исключение составляют соединения между каскадами и подключение конденсатора  $C_H$ , которые необходимо сделать с помощью соединительных проводов со штекерами, соединяя ими в соответствии с заданием каскады или через  $C'_{c1}$ , или через  $C''_{c1}$ , а также подключая  $C_H$ .

В левой части панели расположены ручки управления. Переключатель  $П_1$  устанавливают в одно из двух

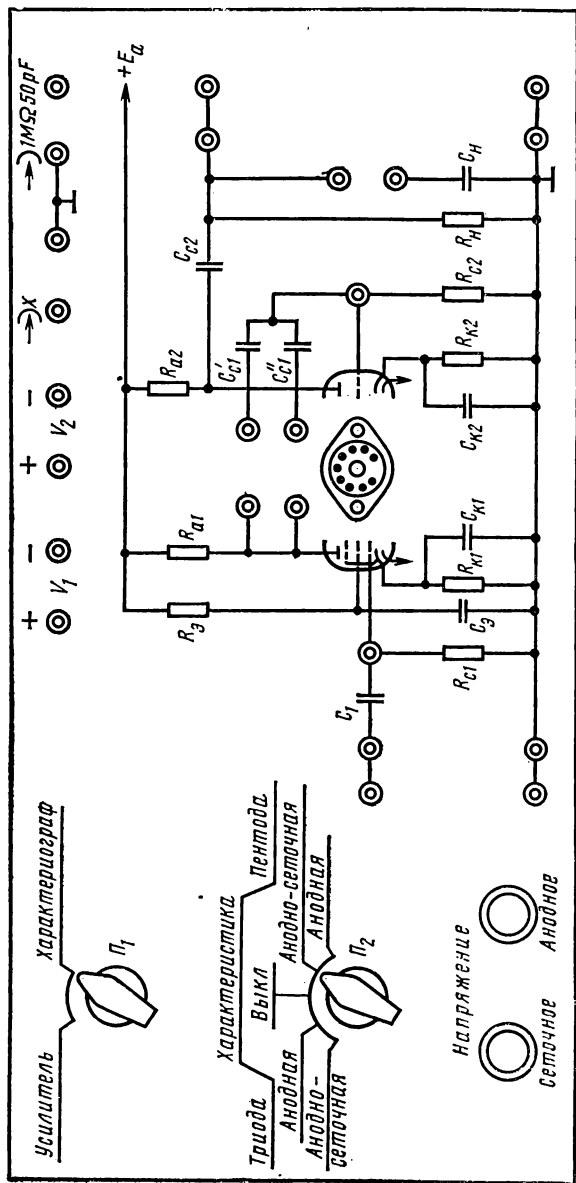


Рис. 1.12. Испытательная панель лабораторного стенда

положений, «Характериограф» или «Усилитель», в зависимости от того, определяются ли вольт-амперные характеристики электронных ламп или характеристики двух-каскадного усилителя, к которому подключается источник анодного питания ( $E_a=200$  В).

При снятии различных вольт-амперных характеристик с помощью характериографа переключателем  $P_2$  подключают соответствующие электронные лампы и их электроды.

Потенциометрами «Напряжение» регулируют сеточное и анодное напряжения соответствующих приборов. При работе характериографа величина этих напряжений контролируется вольтметрами  $V_1$  и  $V_2$ , подключенными к соответствующим гнездам в верхней части панели. При этом гнезда испытательной панели « $\rightarrow$ )Х» и « $\rightarrow$ )  $1M\ \Omega$  50pF» соединяются с одноименным гнездом и разъемом осциллографа С1-68.

Подключение осциллографа С1-68 к исследуемому усилителю производится кабелем, минуя гнезда « $\rightarrow$ )Х» и « $\rightarrow$ )  $1M\ \Omega$  50pF» испытательной панели.

Описание работы характериографа приводится в приложении. Там же даны схемы подключения исследуемой комбинированной лампы к характериографу для снятия анодных и анодно-сеточных характеристик пентодной и триодной частей лампы, которые соответственно изображены на рис. П.12, а, б и П.13, а, б.

## ЗАДАНИЕ

А. Выполняется при подготовке к работе

1. На семействе анодно-сеточных характеристик рис. 1.3 построить динамическую характеристику для сопротивления  $R_a$ , значение которого должно быть взято из табл. 1.2.

2. Рассчитать коэффициент усиления усилителей на пентодной и триодной частях электронной лампы 6Ф1П. Величины  $R_i$ ,  $S$ ,  $\mu$  и  $R_a$  приведены соответственно в табл. 1.1 и 1.2.

3. Определить положение рабочей точки покоя на динамической характеристике, соответствующее минимальным амплитудным искажениям, и построить для нее амплитудную характеристику.

Таблица 1.1

Параметры комбинированной электронной лампы 6Ф1П

Лампа 6Ф1П	$S$ , мА/В	$R_p$ , кОм	$\mu$	$I_a$ , мА	$U_a$ , В	$C_{ск}$ , пФ	$C_{ак}$ , пФ	$C_{са}$ , пФ	$U_{с2}$ , В	$I_{с2}$ , мА
Триодная часть	5	4	20	14	100	2,5	0,3	1,45	—	—
Пентодная часть	6,2	400	2480	10	170	5,5	3,4	0,03	170	4

Таблица 1.2

Параметры элементов двухкаскадного усилителя

Номер бригады	$R_{a1'}$ , кОм	$R_{k1'}$ , Ом	$C_{k1'}$ , мкФ	$R_{э'}$ , кОм	$C_{э'}$ , мкФ	$R_{c1'}$ , $R_{c2'}$ , кОм	$R_{a2'}$ , кОм	$R_{k2'}$ , Ом	$C_{k2'}$ , мкФ
1	20	510	20	12	0,25	510	8,2	390	30
2	22	620	15	10	0,33	510	11	470	25
3	33	910	10	11	0,125	470	9,1	430	25
4	27	820	15	13	0,1	510	10	430	25
5	30	910	10	12	0,125	470	16	620	15
6	24	680	15	9,1	0,33	470	13	510	25
7	18	470	25	10	0,25	470	15	560	15
8	24	750	15	11	0,1	510	12	510	25
9	20	510	20	12	0,25	510	8,2	390	30
10	22	620	15	10	0,33	510	11	470	25
11	33	910	10	11	0,125	470	10	430	25
12	27	820	15	13	0,1	510	16	430	25
13	30	910	10	12	0,125	470	13	620	15
14	25	680	15	9,1	0,33	470	15	510	25
15	18	470	25	10	0,25	470	12	560	15

## Б. Выполняется в лаборатории

1. С помощью характериографа снять анодные характеристики триода и пентода комбинированной лампы 6Ф1П при  $U_{c1} = -1; -2$  и  $-3$  В и  $U_{c2}$  для пентода, равного 170 В.

2. С помощью характериографа снять анодно-сеточные характеристики триода и пентода комбинированной лампы 6Ф1П при  $U_a = 100, 150$  и  $200$  В и  $U_{c2}$  для пентода, равного 170 В.

3. По снятым анодным и анодно-сеточным характеристикам триода и пентода 6Ф1П определить при  $U_{c1} = -2$  В и  $U_a = 150$  В  $R_i$ ,  $S$  и  $\mu$  и сравнить полученные значения с табличными.

4. Снять амплитудную характеристику двухкаскадного усилителя на частоте  $f = 1$  кГц при изменении  $U_{вх}$  от 0 до 0,1 В, определить коэффициент усиления на линейном участке и сравнить его с рассчитанным значением коэффициента усиления.

5. Определить полосу пропускания двухкаскадного усилителя при  $U_{вх} = 10$  мВ для коэффициента частотных искажений

$$M = M_n = M_v = \sqrt{2}:$$

а) при  $C_c = 0,33$  мкФ и  $C_n = 0$ ;

б) при  $C_c = 0,01$  мкФ и  $C_n = 1000$  пФ.

#### **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ**

а) Вольт-амперные характеристики исследуемых электронных электровакуумных приборов снимаются с помощью характеристикиографа. Кривые семейства анодных и анодно-сеточных характеристик триода и пентода осциллографируются при фиксированных значениях соответственно сеточного и анодного напряжений, указанных в задании. При снятии вольт-амперных характеристик подключение электронных ламп к характеристикиографу производится автоматически с помощью переключателей  $P_1$  и  $P_2$  (рис. 1.12). Для этого сначала следует переключатель  $P_1$  поставить в положение «Характериограф». Далее, переключатель  $P_2$  устанавливается в положение «Характеристика триода анодно-сеточная», после чего на экране осциллографа появляются анодно-сеточные характеристики триода. Для того чтобы наблюдать на экране осциллографа анодную характеристику триода, следует переключатель поставить в положение «Характеристика триода анодная». Аналогичным образом осциллографируются вольт-амперные характеристики пентода, для чего переключатель  $P_2$  устанавливается сначала в положение «Характеристика пентода анодно-сеточная», а затем в положение «Характеристика пентода анодная». При исследовании усилителя следует переключатель  $P_1$  поставить в положение «Усилитель».

б) В соответствии с величинами измеряемых напряжений и токов переключатели диапазонов измерительных приборов следует поставить в необходимое положение.

в) При снятии амплитудной характеристики входное напряжение на первый каскад усилителя подается с генератора ГЗ-36. Величина входного и выходного напряжений усилителя измеряется цифровым вольтметром или универсальным электронным вольтметром.

г) Для определения полосы пропускания двухкаскадного усилителя при  $U_{вх}=10$  мВ на частоте, при которой достигается максимальное усиление, соответствующее средним значениям частоты, находят коэффициент усиления усилителя. Выходное напряжение при этом имеет некоторое значение  $U_{вых.макс}$ . Изменяя частоту входного напряжения с помощью соответствующих ручек генератора ГЗ-36, определяют граничные частоты полосы пропускания  $f_H$  и  $f_B$ , на которых выходное напряжение усилителя уменьшается в  $\sqrt{2}$  раза.

д) Включить вместо конденсатора  $C'_c=0,33$  мкФ конденсатор  $C''_c=0,01$  мкФ, а параллельно резистору  $R_B$  включить конденсатор  $C_H=1000$  пФ. После этих изменений вновь определить граничные частоты полосы пропускания  $f'_H$  и  $f'_B$ . Объяснить расхождение с  $f_H$  и  $f_B$ .

е) При определении полосы пропускания необходимо следить за тем, чтобы величина  $U_{вх}$  была все время неизменной.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каково назначение электродов в электровакуумном триоде и пентоде?

2. Как изменится величина статического коэффициента усиления, если управляющую сетку располагать ближе к аноду?

3. Что больше влияет на анодный ток электронного триода, сеточное или анодное напряжение?

4. В чем заключается назначение резистора  $R_a$ ?

5. Для чего включается в сеточную цепь усилителя резистор  $R_c$ ?

6. С какой целью в усилительные лампы вводится экранирующая сетка?

7. Потенциал какого электрода сильнее влияет на величину анодного тока пентода?

8. Почему коэффициент усиления пентодов значительно больше коэффициента усиления триода?

9. Почему динамические характеристики электронных ламп идут ниже и более полого, чем статические анодно-сеточные характеристики?

10. Какие достоинства имеет пентод по сравнению с триодом?



11. Как изменяется коэффициент усиления усилителя с ростом входных напряжений?

12. Как изменится частотная характеристика усилителя при увеличении емкости конденсатора связи  $C_c$ ?

13. Какие элементы усилителя влияют на частотную характеристику в области нижних и верхних частот?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2

### ИССЛЕДОВАНИЕ ИОННЫХ ПРИБОРОВ

**Цель работы:** изучение принципа действия и исследование основных характеристик ионных электровакуумных приборов, знакомство с применением их в параметрических стабилизаторах напряжения и реле времени.

#### КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Ионным электровакуумным прибором (газоразрядным прибором) называется электровакуумный прибор с электрическим разрядом в газе или парах. Электрический разряд в газе определяют как совокупность явлений, происходящих в газе в связи с прохождением через него электрического тока.

Ионный прибор состоит из двух или более электродов различной формы, размещенных внутри герметизированной колбы (обычно стеклянной), заполненной каким-либо инертным газом, водородом или парами (например, ртути) в большинстве случаев под давлением  $10^{-1} \div 10^{-4}$  Па. В ионных приборах в отличие от электронных под действием напряжения движутся как свободные электроны, так и ионы газа или пара.

Классификация ионных электровакуумных приборов ведется по виду электрического разряда: приборы тлеющего разряда, приборы дугового разряда и т. д. В данной работе исследуются ионные приборы тлеющего разряда — стабилитрон и тиратрон.

*Стабилитроном* называют ионный электровакуумный прибор, предназначенный для стабилизации напряжения. У стабилитрона напряжение между электродами в режиме, соответствующем рабочему участку характеристики, мало зависит от разрядного тока. У стабилитрона анод и катод помещаются в стеклянный или металлокерамический баллон, заполненный инертным газом или смесью инертных газов до давления порядка  $10^3$  Па.

На рис. 2.1 изображены устройство и условное графическое изображение стабилитрона. Катод стабилитрона изготовлен в виде полого цилиндра из никеля, стали или молибдена. Внутри него по оси располагается стержневой анод из никеля.

Вольт-амперная характеристика — зависимость разрядного тока стабилитрона от напряжения на стабилитроне — приведена на рис. 2.2. При небольшом анодном напряжении анодный ток остается практически равным нулю. Когда напряжение на стабилитроне достигает значения, равного  $U_{a.в.р.}$ , ток в стабилитроне скачком возрастает до нескольких десятков миллиампер. Это связано с возникновением нормального тлеющего заряда.

После возникновения тлеющего разряда анодное напряжение уменьшается за счет перераспределения входного напряжения между стабилитроном и балластным резистором  $R_6$ , включаемым последовательно со стабилитроном (рис. 2.3). При увеличении входного напряжения ток стабилитрона резко увеличивается.

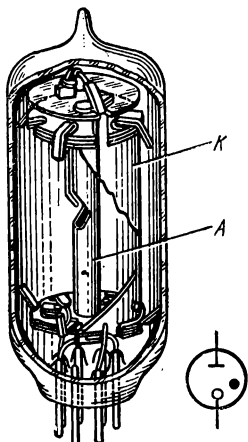


Рис. 2.1. Устройство и условное графическое изображение стабилитрона

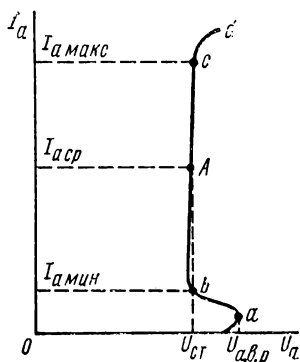


Рис. 2.2. Вольт-амперная характеристика стабилитрона

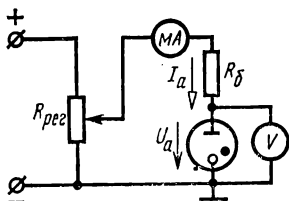


Рис. 2.3. Схема включения стабилитрона для снятия вольт-амперной характеристики

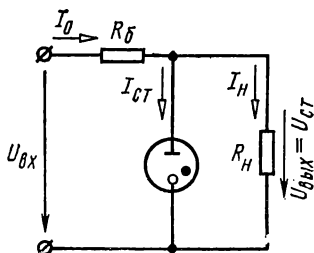


Рис. 2.4. Схема стабилизатора напряжения на стабилитроне

Для стабилизации напряжения на нагрузочном резисторе стабилитрон подключается параллельно резистору. Такое устройство называют стабилизатором напряжения (рис. 2.4). Выходное напряжение стабилизатора, являющееся напряжением на нагрузочном резисторе, будет

$$U_H = U_{вх} - R_6 I_0, \quad (2.1)$$

где

$$I_0 = I_{сг} + I_H.$$

Если по каким-либо причинам возрастает входное напряжение, то резко увеличивается ток стабилитрона (см. рис. 2.2), а следовательно, возрастают ток  $I_0$  и падение напряжения на резисторе  $R_6$ . В результате выходное напряжение остается практически неизменным. Эффективность работы стабилизатора определяется *коэффициентом стабилизации*  $K_{ст}$ :

$$K_{ст} = \frac{\Delta U_{вх}/U_{вх}}{\Delta U_{вых}/U_{вых}} = \frac{\Delta U_{вх} U_{вых}}{\Delta U_{вых} U_{вх}}. \quad (2.2)$$

У стабилизатора с газоразрядным стабилитроном коэффициент стабилизации обычно имеет величину около 10.

Основные электрические параметры стабилитрона: напряжение возникновения разряда  $U_{а.в.р}$ ; напряжение стабилизации (горения)  $U_{ст}$ ; наибольший ток через стабилитрон  $I_{а.макс}$ ; наименьший ток через стабилитрон  $I_{а.мин}$ ; изменение напряжения горения  $\Delta U_a$  при изменении тока от  $I_{а.мин}$  до  $I_{а.макс}$ .

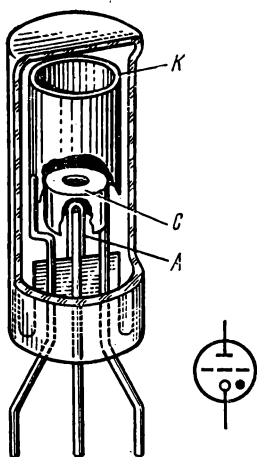


Рис. 2.5. Устройство и условное графическое изображение тиратрона тлеющего разряда

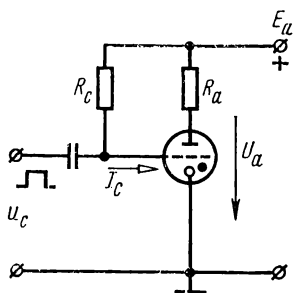


Рис. 2.6. Схема включения тиратрона типа МТХ-90

*Тиратроном тлеющего разряда* называют управляемый ионный прибор тлеющего разряда, в котором при помощи одного или нескольких управляющих электродов обеспечивается управление моментом возникновения разряда.

По способу управления возникновением разряда тиратроны подразделяются на *тиратроны с токовым и электростатическим управлением*. При токовом способе управления возникновение разряда между анодом и катодом происходит тогда, когда сеточный (пусковой) ток достигнет некоторого критического значения — сеточного тока зажигания. Такой способ управления нашел применение в трех-электродном тиратроне типа МТХ-90.

Устройство и условное графическое изображение тиратрона МТХ-90 показаны на рис. 2.5. Катод выполнен в виде полого никелевого цилиндра, внутренняя поверхность которого активирована

цезием, анод — в виде остеклованного молибденового стержня, расположенного соосно с катодом. Сетку устанавливают между катодом и анодом. Изготавливается она в виде полого цилиндра.

Если в цепи рис. 2.6 установить анодное напряжение  $U_a$ , меньшее  $U_{a.в.р.}$ , но достаточное для поддержания разряда, то при отсутствии в сеточной цепи положительного импульса напряжением  $u_c$  тиратрон работать не будет. С появлением положительного напряжения в сеточной цепи появляется небольшой ток  $I_c$ , равный нескольким микроамперам. Одновременно в промежутке сетка — катод возникнет разряд. Заряженные частицы проникают в промежуток анод — сетка, что приводит к появлению тлеющего разряда в промежутке анод — катод. Таким образом, сеточный ток в несколько микроампер вызывает разряд и позволяет получить в анодной цепи

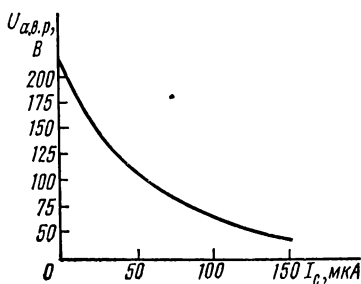


Рис. 2.7. Характеристика зажигания тиратрона тлеющего разряда с токовым управлением

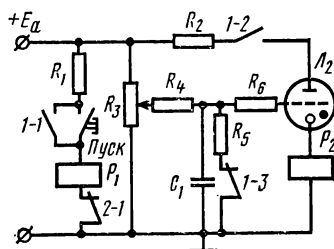


Рис. 2.8. Схема реле времени на тиратроне типа МТХ-90

ток в несколько десятков миллиампер. Включение резистора  $R_c$  создает ток подготовительного разряда  $I_{сп}$  в промежутке сетка — катод, что обеспечивает стабильность возникновения тлеющего разряда в тиратроне.

После возникновения разряда в тиратроне сетка теряет свои управляющие свойства.

Чтобы погасить разряд, необходимо уменьшить анодное напряжение до величины, меньшей напряжения горения.

На рис. 2.7 изображена зависимость анодного напряжения возникновения разряда от сеточного тока  $U_{a.в.р.} = f(I_c)$  (характеристика зажигания). Из характеристики следует, что чем больше сеточный ток, тем меньше величина  $U_{a.в.р.}$ .

Основные электрические параметры тиратронов тлеющего разряда: рабочее анодное напряжение  $U_a$ ; наибольший средний анодный ток  $I_{a.макс.}$ ; рекомендуемый ток подготовительного разряда  $I_{сп}$ .

Ионные приборы широко применяются в устройствах промышленной электроники. Так, стабилизаторы, помимо стабилизаторов напряжения, используются в релаксационных генераторах. Большое распространение получили тиратроны тлеющего разряда. Их применяют в устройствах электроавтоматики, вычислительной техники, импульсной техники для генерирования и усиления колебаний специальной формы, выполнения логических операций и т. д. Тиратроны часто ис-

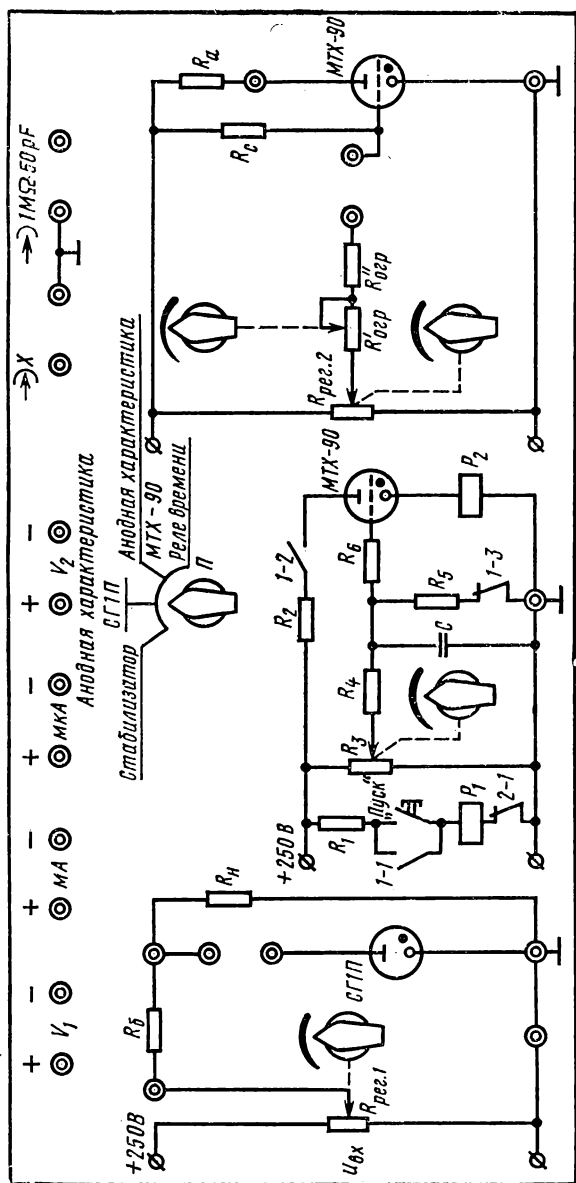


Рис. 2.9. Испытательная панель лабораторного стенда

пользуют в реле напряжений и времени, устройствах контроля, управления и регулирования.

В работе исследуется реле времени на тиратроне МТХ-90. *Реле времени* является устройством, позволяющим получить заданную временную выдержку  $t_{\text{выд}}$ . В исследуемом реле времени (рис. 2.8) величина выдержки определяется временем заряда конденсатора  $C_1$  от источника постоянного напряжения  $E_a = 250$  В до момента, при котором в тиратроне МТХ-90 возникает разряд. *Время выдержки* определяется по формуле

$$t_{\text{выд}} = (R'_3 + R_4) C_1 \ln E_a / (E_a - U_{\text{с.в.р}}),$$

где  $U_{\text{с.в.р}}$  — сеточное напряжение, при котором в тиратроне возникает разряд.

Реле времени начинает работу после нажатия кнопки «Пуск». При этом срабатывает электромеханическое реле  $P_1$ , которое самоблокируется своим контактом 1—1, поддерживая тем самым реле  $P_1$  в рабочем состоянии. В результате срабатывания реле  $P_1$  контакты 1—2 замыкаются и на тиратрон МТХ-90 подается анодное напряжение. Контакты 1—3 размыкаются, и конденсатор  $C_1$  (до этого замкнутый на резистор с очень малым сопротивлением  $R_5$ ) начинает заряжаться от источника  $E_a$  через резисторы  $R_3$  и  $R_4$ . При достижении напряжения на конденсаторе величины, равной  $U_{\text{с.в.р}}$ , в тиратроне возникает разряд, срабатывает электромеханическое реле  $P_2$ , включенное в катодную цепь тиратрона. Контакты 2—1 размыкаются и обесточивают обмотку реле  $P_1$ . В результате этого контакты 1—2 размыкаются и в тиратроне прекращается разряд. Контакты 1—3 замыкаются, конденсатор  $C_1$  разряжается на резистор  $R_5$ , и реле времени возвращается в исходное состояние.

## ОПИСАНИЕ ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ ПАНЕЛИ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Исследуемые в работе ионные приборы расположены на испытательной панели (рис. 2.9). Вольт-амперные характеристики снимаются с помощью характериографа, описание которого приводится в приложении. Схемы подключения исследуемых стабилитрона и тиратрона к характериографу изображены соответственно на рис. П.14, а, б.

Ионные приборы подключают к характериографу переключателем  $\Pi$ . Питание ионных электровакуумных приборов осуществляется от источника напряжения +250 В. Резисторы  $R_b$  стабилизатора,  $R_a$  и  $R_c$  в анодной и сеточной цепях тиратрона установлены на испытательной панели и соединены с электродами соответствующих приборов и источником питания.

Регулирование входного напряжения стабилизатора, который расположен в левой части испытательной панели, производится переменным резистором  $R_{\text{пер1}}$ .



В сеточной цепи тиратрона МТХ-90, схема включения которого изображена в правой части испытательной панели, изменение сеточного тока зажигания осуществляется двумя переменными резисторами:  $R_{\text{рег2}}$  и  $R'_{\text{огр}}$ . В центре испытательной панели расположено реле времени на тиратроне МТХ-90.

Измерительные приборы (вольтметры и узкопрофильные амперметры) подключены к гнездам в верхней части панели. Гибкими проводниками со штекерами они подсоединяются к соответствующим участкам исследуемых цепей. При снятии вольт-амперных характеристик с помощью характериографа гнезда испытательной панели « $\rightarrow$ ) X» и « $\rightarrow$ ) 1M $\Omega$ 50pF» соединяются с одноименными разъемами на осциллографе С1-68.

### ЗАДАНИЕ

А. Выполняется при подготовке к работе

1. Изобразить зависимость  $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$  для параметрического стабилизатора.

2. Начертить семейство характеристик  $I_a = f(U_a)$  при трех значениях  $I_c$  на тиратроне МТХ-90.

Б. Выполняется в лаборатории

1. Снять вольт-амперную характеристику стабилизатора СГП, определив напряжение возникновения разряда и рабочий предел изменения анодного тока.

2. Снять зависимость  $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$  параметрического стабилизатора на стабилизаторе.

3. Определить коэффициент стабилизации стабилизатора.

4. Снять анодные характеристики  $I_a = f(U_a)$  тиратрона с токовым управлением (типа МТХ-90) при  $I_c = 0,5, 10, 20, 30$  мкА.

5. По результатам п. 4 построить характеристику зажигания  $U_{a.в.р} = f(I_c)$  тиратрона МТХ-90.

6. Измерить время выдержки реле времени на тиратроне МТХ-90 для двух положений переменного резистора  $R_3$  (рис. 2.9).

### МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

а) Падение напряжения на ионных приборах  $U_a$  измеряют цифровым или универсальным вольтметром.

Измерение токов производится узкопрофильными амперметрами. В соответствии с измеряемыми величинами напряжений и токов переключатель диапазонов измерительных приборов следует поставить в необходимое положение.

б) При осциллографировании характеристик стабилитрона СГ1П и тиратрона МТХ-90 переключатель  $\Pi$  (рис. 2.9) следует поставить соответственно в положения «Анодная характеристика СГ1П» и «Анодная характеристика МТХ-90». Для получения характеристики зажигания  $U_{a.v.p}=f(I_c)$  тиратрона МТХ-90 необходимо при нескольких значениях тока  $I_c$ , величина которого фиксируется микроамперметром, зарисовать осциллограммы  $I_a=f(U_a)$ , по которым найти величину  $U_{a.v.p}$ . При снятии зависимости  $U_{вых}=f(U_{вх})$  для параметрического стабилизатора на стабилитроне СГ1П переключатель  $\Pi$  следует поставить в положение «Стабилизатор».

в) Для построения кривых  $U_{a.v.p}=f(I_c)$  тиратрона МТХ-90 необходимо воспользоваться семейством кривых  $I_a=f(U_a)$ , на которых следует определить для каждого значения  $I_c$  анодное напряжение возникновения разряда.

г) При работе с реле времени на тиратроне МТХ-90 переключатель  $\Pi$  поставить в положение «Реле времени». Время выдержки реле измеряют с помощью секундомера (или секундной стрелки ручных часов) в одном из положений ручки переменного резистора  $R_3$  (рис. 2.9). Затем, установив новое положение резистора  $R_3$ , вновь измерить время выдержки. Подсчитать, на сколько изменилось сопротивление зарядной цепи конденсатора.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключаются основные достоинства и недостатки ионных приборов по сравнению с электронными?
2. Какой вид газового разряда используется в стабилитроне?
3. Для чего в анодную цепь стабилитрона включают балластный резистор  $R_6$ ?
4. Как изменится коэффициент стабилизации стабилизатора, если замкнуть балластный резистор  $R_6$ ?
5. Почему напряжение стабилитрона мало изменяется в рабочем диапазоне изменений тока?
6. Каково назначение сетки в тиратроне?
7. Каким образом можно погасить тиратрон?
8. Как изменяется анодный ток при зажигании тиратрона?
9. Влияет ли изменение сеточного напряжения на величину анодного тока работающего тиратрона?
10. Чем определяется величина анодного тока тиратрона?

11. Для чего в анодную цепь тиратрона включают резистор  $R_a$ ?
12. Как изменяется анодное напряжение тиратрона после его зажигания?
13. Чем определяется время выдержки реле времени?
14. На чем основывается использование ионных приборов в реле времени?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНЗИСТОРОВ И ТРАНЗИСТОРНЫХ ОДНОКАСКАДНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

**Цель работы:** исследование характеристик биполярных транзисторов и однокаскадных транзисторных усилителей.

#### КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Статические характеристики транзистора и его схема замещения. Транзистор — полупроводниковый прибор с несколькими  $p$ - $n$ -переходами, пригодный для усиления мощности электрических сигналов и имеющий три вывода или более. Ши-

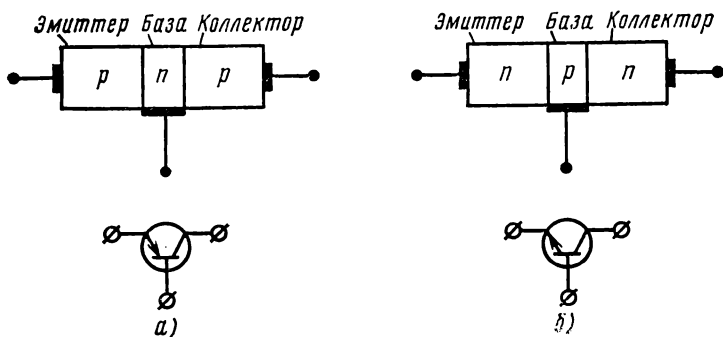


Рис. 3.1. Транзисторы типа  $p$ - $n$ - $p$  (а) и  $n$ - $p$ - $n$  (б)

роко распространены биполярные транзисторы с двумя  $p$ - $n$ -переходами и чередованием полупроводниковых слоев  $p$ - $n$ - $p$  или  $n$ - $p$ - $n$ . На рис. 3.1 схематически показано устройство и даны условные графические изображения биполярных транзисторов. Крайние слои называются соответственно *эмиттером* и *коллектором*, а средний — *базой*.

К переходу эмиттер — база напряжение приложено в прямом (проводящем) направлении. Это напряжение мало ( $0,1 \div 0,5$  В). К  $p$ - $n$ -переходу коллектор — база при нормальном включении напряжение приложено в обратном (запирающем) направлении, поэтому это напряжение сравнительно велико ( $10 \div 30$  В).

Рассмотрим семейства статических вольт-амперных характеристик и схемы включения транзисторов типа *p-n-p*. Для транзисторов типа *p-n-p* характеристики и схемы включения аналогичны. При использовании транзистора, имеющего три электрода, в усилителе с двумя входными и двумя выходными зажимами один из электродов транзистора относится к входной цепи, другой — к выходной, а третий — общий относительно входной и выходной цепей. В зависимости от того, какой электрод общий, получают три основные схемы включения транзистора: с общей базой, общим эмиттером и общим коллектором.

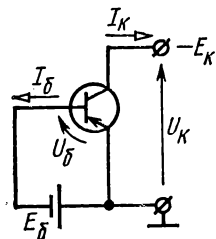


Рис. 3.2. Схема включения транзистора с общим эмиттером

Наибольшее распространение из схем включения транзисторов получила схема с общим эмиттером (рис. 3.2), обладающая рядом преимуществ по сравнению с двумя другими схемами включения транзисторов (табл. 3.1). Для анализа усилителей используются семейства входных и выходных характеристик транзистора. Для схемы с общим эмиттером входными являются зависимости  $I_б = f(U_б)$  (при  $U_к = \text{const}$ ) (рис. 3.3, а), а выходными — коллекторные характеристики  $I_к = f(U_к)$  (при  $I_б = \text{const}$ ) (рис. 3.3, б).

Таблица 3.1

Сопоставление различных схем включения транзисторов

Параметр	Схема включения		
	с общей базой	с общим эмиттером	с общим коллектором
Входное сопротивление	50 ÷ 100 Ом	200 ÷ 2000 Ом	10 ÷ 500 кОм
Выходное сопротивление	0,1 ÷ 0,5 МОм	30 ÷ 70 кОм	50 ÷ 100 Ом
Коэффициент усиления по напряжению	30 ÷ 400	30 ÷ 1000	≈ 1
Коэффициент усиления по току	≈ 1	10 ÷ 200	10 ÷ 200
Коэффициент усиления по мощности	30 ÷ 400	3000 ÷ 30 000	10 ÷ 200

Входные характеристики при изменении  $U_к$  в широких пределах изменяются незначительно, поэтому обычно пользуются одной характеристикой  $I_б = f(U_б)$ , соответствующей некоторому среднему значению  $U_к$ .

При работе усилителя входные величины ( $I_б$ ,  $U_б$ ) получают приращения  $\Delta I_б$  и  $\Delta U_б$ , которые, в свою очередь, вызывают изменения значений  $I_к$  и  $U_к$  ( $\Delta I_к$  и  $\Delta U_к$ ). Если входной сигнал имеет небольшую величину, то эти приращения малы и работа усилителя будет проходить на линейных участках входных и выходных характеристик.

В этом случае транзистор может быть представлен в виде линейного четырехполюсника. Для транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, справедливы следующие уравнения:

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_6 &= h_{11} \Delta I_6 + h_{12} \Delta U_K, \\ \Delta I_K &= h_{21} \Delta I_6 + h_{22} \Delta U_K, \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

где  $h_{11} \approx |\Delta U_6 / \Delta I_6|_{U_K = \text{const}}$  — входное сопротивление транзистора;

$h_{21} \approx |\Delta I_K / \Delta I_6|_{U_K = \text{const}}$  — коэффициент усиления по току ( $h_{21}$  часто обозначают  $\beta$ );

$h_{12} \approx |\Delta U_6 / \Delta U_K|_{I_6 = \text{const}}$  — коэффициент внутренней обратной связи;

$h_{22} \approx |\Delta I_K / \Delta U_K|_{I_6 = \text{const}}$  — выходная проводимость транзистора.

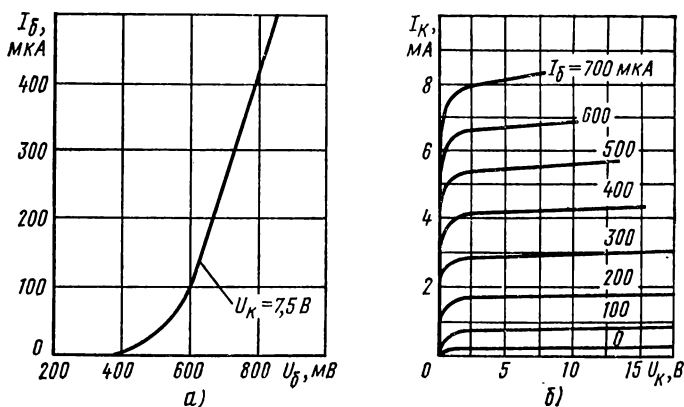


Рис. 3.3. Входная (а) и семейство выходных (б) статических характеристик транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером

Параметры  $h_{11}$  и  $h_{21}$  определяются при коротком замыкании цепи коллектора по переменному току,  $h_{12}$  и  $h_{22}$  — при холостом ходе в цепи базы по переменному току. Так как входное напряжение  $U_6$  мало зависит от выходного  $U_K$ , то  $h_{12} \approx 0$ . Полученные соотношения справедливы для схемы включения транзистора с общим эмиттером. Однако не представляет труда получить аналогичные соотношения через  $h$ -параметры и для других схем включения транзисторов. При этом в качестве независимых переменных (а всего переменных — четыре) берутся приращения тока и напряжения во входной и выходной цепях соответственно. Зависимые приращения напряжения входной и тока выходной цепей выражаются через сумму независимых переменных с соответствующими  $h$ -коэффициентами. Подчеркнем еще раз, что такое представление возможно при условии, что нелинейный элемент (транзистор) может рассматриваться в линейном

приближении. Это требование накладывает ограничение на амплитуду сигнала и рабочую область характеристики.

В соответствии с уравнениями (3.1) на рис. 3.4 изображена схема замещения транзистора при  $h_{12}=0$ .  $h$ -параметры можно определить по семействам входных и выходных характеристик,  $h$ -параметры хорошо описывают работу транзистора в области низких частот. При работе на высоких частотах коэффициент усиления по току  $h_{21}$  из-за инерционности носителей заряда уменьшается. Кроме того, на повышенных частотах начинает сказываться влияние междуэлектродной емкости  $p$ - $n$ -перехода коллектор — база.

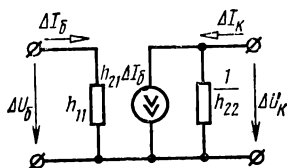


Рис. 3.4. Схема замещения транзистора

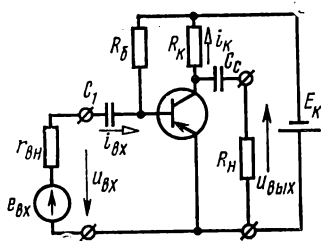


Рис. 3.5. Усилительный каскад с общим эмиттером

Усилительный каскад с общим эмиттером на биполярном транзисторе. Принципиальная схема усилительного каскада с общим эмиттером приведена на рис. 3.5. Источник переменной э. д. с.  $e_{вх}$  с внутренним сопротивлением  $r_{вн}$  подключается к входным зажимам усилителя. Усиленное выходное напряжение снимается с нагрузочного резистора  $R_n$ . При этом выходная мощность усиленного сигнала значительно больше мощности сигнала на входе усилителя. Это увеличение мощности происходит за счет потребления энергии источника питания  $E_k$ . Начальные значения  $I_{б0}$ ,  $U_{б0}$ ,  $I_k$ ,  $U_{к0}$ , определяющие рабочую точку на характеристиках транзистора в режиме покоя ( $e_{вх}=0$ ), зависят от величин э. д. с.  $E_k$  источника питания, сопротивлений резисторов  $R_k$  и  $R_b$ .

Э. д. с.  $e_{вх}$  вызывает во входной цепи переменную составляющую тока  $i_{вх}$ , которая суммируется в цепи базы с постоянной составляющей тока  $I_{б0}$  ( $I_{вх} < I_{б0}$ ). Благодаря конденсатору  $C_1$  в источнике входного напряжения отсутствует постоянная составляющая тока базы. Переменный ток  $i_{вх}$  вызывает появление переменной составляющей в коллекторном токе ( $i_k \approx h_{21} i_b \approx h_{21} i_{вх}$ ) и коллекторном напряжении ( $u_k = i_k R_k$ ). Переменная составляющая коллекторного напряжения через конденсатор связи  $C_c$  поступает на выход усилителя и создает в резисторе  $R_n$  выходной ток  $i_{вых}$ . Если сопротивления резисторов  $R_k$  и  $R_n$  выбрать достаточно большими, то переменная составляющая коллекторного напряжения, а значит, и выходное напряжение будут значительно превышать входное напряжение.

Существует несколько методов расчета основных параметров, характеризующих работу усилителя: коэффициентов усиления по напряжению  $K_U$ , току  $K_I$  и мощности  $K_P$ , входного  $R_{вх}$  и выходного  $R_{вых}$  сопротивлений. Наиболее простым является графоаналитический метод, при котором выбор рабочей точки производится графически.

чески, а для расчета других параметров пользуются  $h$ -параметрами транзистора.

Рассмотрим усилитель с общим эмиттером, работающий с высокоомным источником входного напряжения, у которого внутреннее сопротивление  $r_{вн}$  соизмеримо с входным сопротивлением усилителя. На выходных характеристиках (рис. 3.6) проводим линию нагрузки в соответствии с уравнением  $U_K = E_K - R_K I_K$  ( $E_K = 15$  В,  $R_K = 2$  кОм) и по точкам пересечения линии нагрузки с выходными характеристиками транзистора строим переходную характеристику усилителя

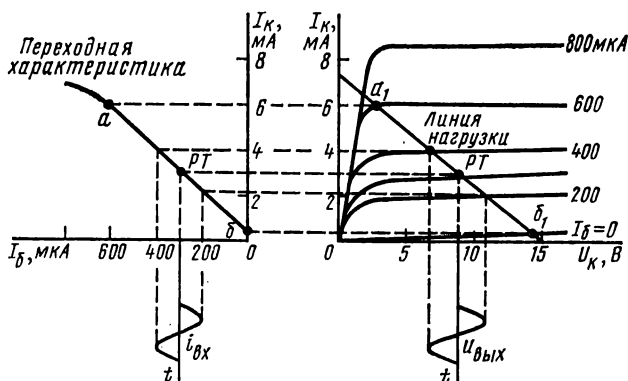


Рис. 3.6. Построение линии нагрузки, переходной характеристики и выходного напряжения

$I_K = f(I_B)$ . Рабочую точку покоя выбираем в средней части линейного участка переходной характеристики  $ab$ , что соответствует примерно середине рабочего участка линии нагрузки  $a_1b_1$ . В рабочей точке покоя  $I_K = 3$  мА,  $U_{K0} = 8$  В,  $I_{B0} = 300$  мкА. По входной характеристике определяем  $I_{B0}$  по известной величине  $I_{B0}$ . Для создания требуемого тока базы  $I_{B0}$

$$R_6 = \frac{E_K - U_{B0}}{I_{B0}} \approx 50 \text{ кОм.}$$

По известной величине входного тока  $i_{вх} \approx e_{вх} / (r_{вн} + h_{11})$  по переходной характеристике определяется переменная составляющая  $i_K$  тока коллектора, а по линии нагрузки — переменная составляющая коллекторного напряжения и выходное напряжение усилителя. Если амплитуда входного тока больше 300 мкА, т. е.  $e_{вх} > 300 \cdot 10^{-6} (r_{вн} + h_{11})$ , то возникнут значительные искажения выходного напряжения, которые обусловлены нелинейностью переходной характеристики транзистора.

Для расчета параметров усилителя ( $K_U$ ,  $K_I$ ,  $K_P$  и т. д.) необходимо определить  $h$ -параметры вблизи рабочей точки по семействам соответствующих характеристик. При этом коэффициент усиления усилителя по напряжению в области средних частот

$$K_U = \frac{U_{вых}}{E_{вх}} = \frac{h_{21}}{r_{вн} + h_{11}} \cdot \frac{R_K R_H}{R_K + R_H + R_K R_H h_{22}} \quad (3.2)$$

(часто слагаемым  $R_K R_H h_{22}$  можно пренебречь);  
коэффициент усиления по току

$$K_I = \frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}} = h_{21} \frac{R_K}{R_K + R_H + R_K R_H h_{22}}; \quad (3.3)$$

коэффициент усиления по мощности  $K_P = K_U K_I$ ;  
входное сопротивление усилителя

$$R_{\text{вх}} = h_{11} R_6 / (h_{11} + R_6) \approx h_{11}, \quad (3.4)$$

так как  $R_6 \gg h_{11}$ ;

выходное сопротивление

$$R_{\text{вых}} = R_K / (1 + h_{22} R_K). \quad (3.5)$$

Очевидно, что коэффициент усиления по напряжению существенно зависит от  $R_H$ ,  $R_K$  и внутреннего сопротивления источника входного напряжения  $r_{\text{вн}}$ , ограничивающего переменную составляющую тока базы.

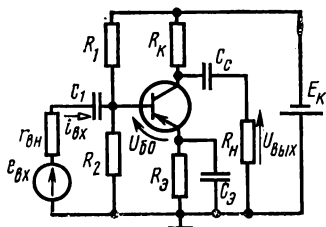


Рис. 3.7. Усилительный каскад с общим эмиттером со стабилизацией рабочей точки

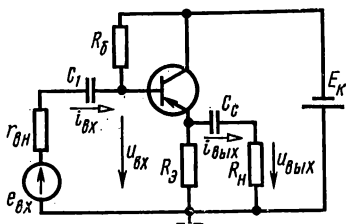


Рис. 3.8. Усилительный каскад с общим коллектором

Емкости конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$  должны быть такими, чтобы на всех частотах усиливаемых напряжений  $1/\omega C_1 \ll R_{\text{вх}}$ , а  $1/\omega C_2 \ll R_H$ .

Отметим, что выходное напряжение усилительного каскада с общим эмиттером отличается по фазе от входного напряжения примерно на  $180^\circ$ .

Существенным недостатком рассмотренной схемы усилителя (см. рис. 3.5) является зависимость его параметров от температуры, что обусловлено температурной нестабильностью транзистора. Кроме того, такой усилитель требует регулировки при смене транзистора. Эти недостатки частично отсутствуют в усилительном каскаде, схема которого приведена на рис. 3.7. В этом усилительном каскаде для повышения температурной стабильности в цепь эмиттера включен резистор  $R_3$ , шунтированный конденсатором  $C_3$ , устраняющим отрицательную обратную связь, возникающую за счет падения напряжения на резисторе  $R_3$  от переменной составляющей тока  $I_3$ . В цепь базы для создания начального напряжения смещения  $U_{60}$  включен делитель  $R_1, R_2$ .



Усилительный каскад с общим коллектором (рис. 3.8). В этом усилительном каскаде все выходное напряжение  $u_{вых}$  введено последовательно во входную цепь, т. е. имеет место стопроцентная отрицательная обратная связь. Как и в предыдущем усилительном каскаде, источник питания  $E_k$ , резисторы  $R_6$  и  $R_9$  служат для получения определенного положения рабочей точки покоя. Э. д. с.  $e_{вх}$  вызывает появление во входной цепи переменного тока  $i_{вх} \approx i_6$ , а в цепи эмиттера —  $i_3$  и  $i_{вых}$ . Так как  $i_3 \gg i_6$ , то данный каскад является усилителем тока, т. е.  $K_I \gg 1$ .

Выходное напряжение, как видно из схемы, составляет часть входного. Фаза выходного напряжения практически совпадает с фазой входного. Учитывая, что выходное напряжение по величине и по фазе примерно равно входному, усилительный каскад с общим коллектором часто называют *эмиттерным повторителем*.

Входное сопротивление  $R_{вх}$  эмиттерного повторителя может достигать очень больших величин (до 500 кОм). Выходное сопротивление  $R_{вых}$  имеет обычно небольшую величину.

Основное назначение усилительного каскада с общим коллектором — согласование высокоомного источника входного напряжения с низкоомным нагрузочным резистором.

## ОПИСАНИЕ ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ ПАНЕЛИ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

В верхней части панели лабораторной установки (рис. 3.9) находятся клеммы источника питания 15 и 7,5 В (с делителем напряжения), входные клеммы цифровых вольтметров ( $V_1$  и  $V_2$ ) и измерителей тока (мА и мкА).

В работе необходимо снять входные и выходные характеристики транзистора  $T_1$ , который вместе с укрепленными рядом элементами (резисторы, конденсаторы) используется для построения усилительного каскада по схеме с общим эмиттером (см. рис. 3.5). Переменные градуированные резисторы  $R$  и  $R'$  используются для измерения входного и выходного сопротивлений этого каскада.

Транзистор  $T$  и находящиеся рядом элементы используются для построения усилительного каскада по схеме с общим коллектором.

Транзистор  $T_2$  используется для построения усилительного каскада с общим эмиттером по схеме, изображенной на рис. 3.7. Этот усилительный каскад используется для построения многокаскадного усилителя, исследуемого в работе 4. Зажимы, общие для входа и выхода усилителя, и одна из клемм источника питания заземлены.

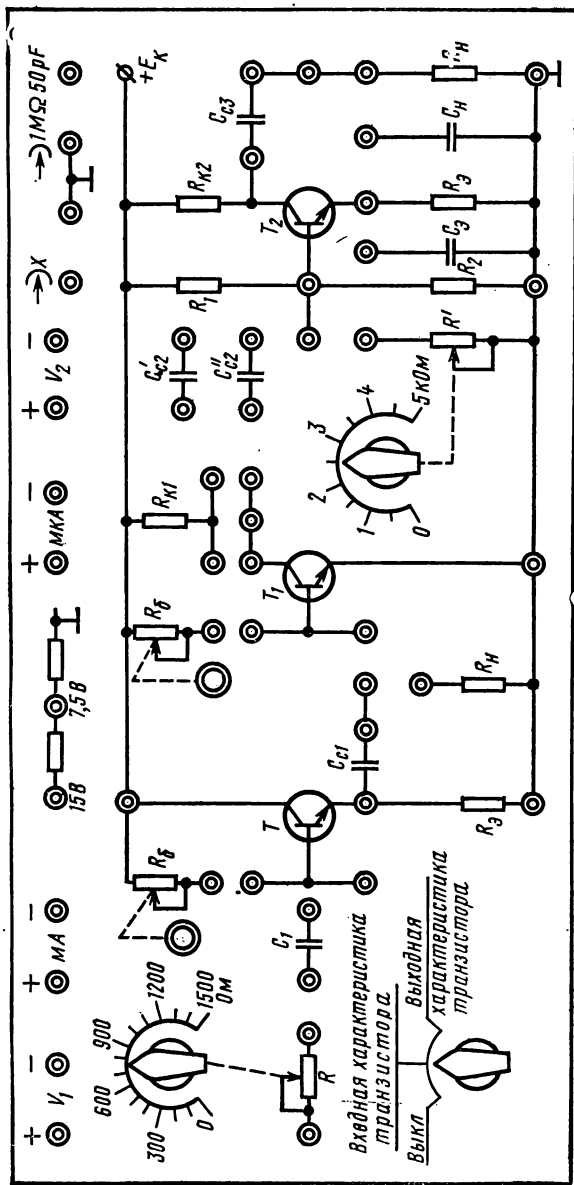


Рис. 3.9. Испытательная панель лабораторного стенда

## ЗАДАНИЕ

### А. Выполняется при подготовке к работе

Пользуясь входными и выходными характеристиками транзистора МП-111, включенного по схеме с общим эмиттером (см. рис. 3.3), рассчитать основные параметры усилителя, схема которого изображена на рис. 3.5 (коэффициент усиления по напряжению, входное и выходное сопротивление), при  $E_k = 15$  В,  $r_{вн} = 50$  Ом для  $R_H = \infty$  и  $R_H = 1,2$  кОм.

Значения сопротивлений коллекторных резисторов  $R_k$  и емкостей конденсаторов связи  $C_c$  для различных вариантов сведены в табл. 3.2.

Т а б л и ц а 3.2

Номер бригады	$R_k$ , кОм	$C_c$ , мкФ	Номер бригады	$R_k$ , кОм	$C_c$ , мкФ
1	1,2	1,0	9	1,6	1,5
2	1,3	1,0	10	1,8	1,5
3	1,5	1,0	11	1,2	2,2
4	1,6	1,0	12	1,3	2,2
5	1,8	1,0	13	1,5	2,2
6	1,2	1,5	14	1,6	2,2
7	1,3	1,5	15	1,8	2,2
8	1,5	1,5			

### Б. Выполняется в лаборатории

1. Снять статическую входную характеристику транзистора  $T_1$  типа МП-111, включенного по схеме с общим эмиттером при  $U_k = 7,5$  В.

Снять семейство выходных характеристик транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, при фиксированных значениях тока базы  $I_b = 0; 100; 200; 300; 400; 600$  мкА.

2. При заданном значении сопротивления коллекторного резистора  $R_{k1}$  провести линию нагрузки по постоянному току, определить положение рабочей точки ( $I_{b0}, U_{b0}, U_{k0}, I_{k0}$ ) и рассчитать значения  $h$ -параметров транзистора в рабочей точке.

3. Собрать однокаскадный усилитель по схеме с общим эмиттером и регулировкой резистора  $R_b$  установить найденное значение  $I_{b0}$ . Измерить  $U_{b0}, I_{k0}, U_{k0}$ .

4. Снять и построить амплитудную характеристику  $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$  усилителя на частоте  $f = 1$  кГц, изменяя  $U_{\text{вх}}$  в диапазоне  $0 \div 500$  мВ, и рассчитать коэффициент усиления по напряжению  $K_U$  на линейном участке характеристики. Зарисовать осциллограмму выходного напряжения при  $U_{\text{вх}} = 5,0$  мВ и 500 мВ.

5. Измерить входное и выходное сопротивления усилителя на частоте  $f = 1$  кГц.

6. Собрать однокаскадный усилитель на транзисторе по схеме с общим коллектором и регулировкой резистора  $R_6$  установить найденное в п. 2 значение  $I_{60}$ .

7. Снять и построить амплитудную характеристику исследуемого усилителя на частоте  $f = 1$  кГц при  $U_{\text{вх}} = 0 \div 3$  В и определить коэффициент усиления по напряжению  $K_U$  на линейном участке характеристики.

### МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

а) Рекомендуемый порядок расчета усилительного каскада с общим эмиттером: провести линию нагрузки по постоянному току ( $U_K = E_K - R_K I_K$ ) и построить переходную характеристику  $I_K = f(I_6)$ ; выбрать рабочую точку покоя, определить  $I_{60}$ ,  $I_{K0}$ ,  $U_{60}$  и  $U_{K0}$  (по входной и выходным характеристикам); найти  $h_{11}$ ,  $h_{21}$ ,  $h_{22}$  по входной и выходным характеристикам в рабочей точке покоя. При расчете  $h_{11}$  по входной характеристике обратить внимание на пределы линейности характеристики вблизи рабочей точки. Это определяет максимально допустимое значение амплитуды входного напряжения, которое усиливается без искажений; используя значения параметров транзистора, рассчитать  $K_U$ ,  $R_{\text{вх}}$  и  $R_{\text{вых}}$  по соответствующим формулам.

б) Пункт 1 задания выполняется с помощью характеристикиографа. Зарисовав с экрана осциллографа входные и выходные характеристики, необходимо сразу же нанести масштаб (см. описание характеристикиографа).

в) При определении параметра  $h_{22}$  по выходным характеристикам изменение коллекторного напряжения можно брать в пределах всей линейной части характеристики вблизи рабочей точки.

г) Для выбора рабочей точки покоя в базовую цепь усилителя последовательно с переменным резистором  $R_6$  включается микроамперметр. В коллекторную цепь вклю-

чается миллиамперметр. После установления рабочей точки и измерения  $I_{б0}$ ,  $U_{б0}$ ,  $U_{к0}$ ,  $I_{к0}$  измерители тока необходимо отключить.

д) Напряжение с выхода звукового генератора ГЗ-36 подается на вход усилителя через конденсатор  $C_1 = 30$  мкФ. Усиленное напряжение измеряется с помощью цифрового вольтметра. Одновременно по экрану осцил-

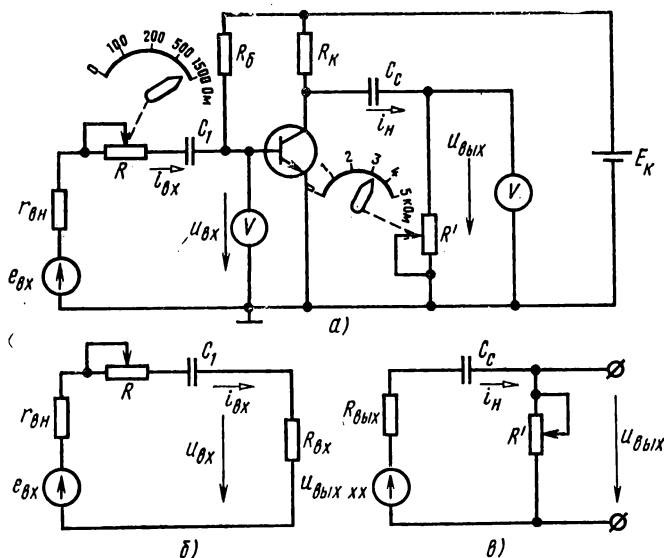


Рис. 3.10. Схема (а) для измерения входного и выходного сопротивлений усилителя и схемы замещения входной (б) и выходной (в) цепей этого усилителя

лографа необходимо следить за искажениями выходного напряжения усилителя (отличием его формы от синусоидальной). Осциллограммы необходимо зарисовать при одинаковом положении ручек осциллографа.

е) Измерение входного и выходного сопротивлений усилителя производится с помощью двух переменных градуированных резисторов ( $R$  и  $R'$ ), присоединяемых к усилителю, как это показано на рис. 3.10, а;  $E_{вх} = 5$  мВ — напряжение на выходе звукового генератора,  $r_{вх} = 7,5$  Ом — его внутреннее сопротивление. Резистор  $R$  и входная цепь усилителя с сопротивлением  $R_{вх}$  образуют делитель напряжения (рис. 3.10, б), при этом  $U_{вх}$  зависит

от соотношения  $R$  и  $R_{вх}$ , причем  $R_{вх}$ , как следует из формулы (3.4), определяется в основном входным сопротивлением транзистора  $h_{11}$ . Емкость конденсатора  $C_1$  и сопротивление  $r_{вн}$  подобраны так, что

$$1/\omega C_1 \ll R_{вх}, r_{вн} \ll R_{вх}, \text{ при этом}$$

$$I_{вх} = E_{вх}/(R + R_{вх}), U_{вх} = E_{вх} R_{вх}/(R + R_{вх}).$$

Если  $R=0$ , то  $U_{вх}=E_{вх}$ , если  $R=R_{вх}$ , то  $U_{вх}=E_{вх}/2$ .

Выходное напряжение усилителя для этих значений сопротивления резистора  $R$  также отличается вдвое. Таким образом, измерение  $R_{вх}$  заключается в следующем: устанавливается  $R=0$  и фиксируется с помощью вольтметра значение выходного напряжения  $U_{вых}$ ;

изменяется сопротивление резистора  $R$  до значения, при котором вольтметр покажет  $U_{вых}/2$ .

Полученное значение сопротивления  $R$  равняется  $R_{вх}$ .

Аналогичная методика применяется при измерении выходного сопротивления. Усилитель со стороны выходных зажимов может быть представлен как активный двухполюсник с э. д. с.  $U_{вых.х.х}$  и выходным сопротивлением  $R_{вых}$  (рис. 3.10, в). Если считать, что  $1/\omega C_c \ll R_{вых}$ , то  $U_{вых} = U_{вых.х.х}$  (при  $R_n = \infty$ ) и  $U_{вых} \approx U_{вых.х.х}/2$  (при  $R_n = R_{вых}$ ). Измерение сводится к следующим операциям:

устанавливается  $R' = R_n = \infty$  (холостой ход) и фиксируется с помощью вольтметра некоторое значение выходного напряжения  $U_{вых.х.х}$ ;

изменяется сопротивление резистора  $R'$  до значения, при котором вольтметр покажет  $U_{вых.х.х}/2$ .

Полученное значение сопротивления резистора  $R'$  равняется  $R_{вых}$ .

ж) При выполнении п. 7 необходимо обратить внимание на значение входного напряжения, при котором искажения выходного напряжения становятся заметными.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое транзистор и для чего он используется?
2. Чем отличаются транзисторы типа  $p-n-p$  от транзисторов типа  $n-p-n$ ?
3. Какие схемы включения транзисторов используют?
4. Чем различаются схемы включения транзисторов?
5. Какие характеристики являются входными и выходными каждой из схем включения транзистора?
6. Каково соотношение между токами эмиттера, коллектора и базы транзистора?

7. Что такое  $h$ -параметры транзистора?
8. Как определить по характеристикам коэффициент усиления транзистора по току ( $h_{21}$ ) в схеме с общим эмиттером?
9. Каково назначение элементов в усилителе, схема которого показана на рис. 3.5?
10. Объясните назначение каждого элемента схемы замещения транзистора, показанной на рис. 3.4.
11. В чем преимущество усилителя с общим коллектором перед другими усилителями?
12. Каким образом производится измерение входного и выходного сопротивлений усилителя?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4

### ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОКАСКАДНЫХ ТРАНЗИСТОРНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

**Цель работы:** исследование основных характеристик многокаскадных транзисторных усилителей с резистивно-емкостной связью.

#### КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

В устройствах промышленной электроники очень часто применяют многокаскадные усилители, так как коэффициент усиления однокаскадного усилителя имеет сравнительно небольшую величину.

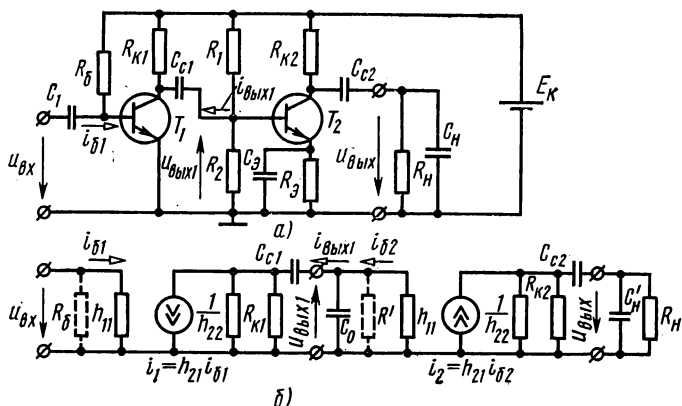


Рис. 4.1. Двухкаскадный усилитель с резистивно-емкостной связью (а) и схема его замещения (б)

На рис. 4.1, а приведена схема двухкаскадного усилителя с резистивно-емкостной связью на транзисторах типа  $p$ - $p$ - $n$ , включенных по схеме с общим эмиттером.

Входное напряжение усиливается первым каскадом усилителя на транзисторе  $T_1$ . Сигнал, усиленный первым каскадом, через конденсатор связи  $C_{с1}$  поступает на вход второго каскада, выполненного на транзисторе  $T_2$ . Второй каскад нагружен на резистор  $R_n$ , параллельно которому включен конденсатор  $C_n$ . Конденсатор  $C_n$  в усилителе служит для устранения отрицательной обратной связи по переменному току, которая может возникать при его отсутствии за счет падения напряжения на резисторе  $R_n$ , включенном в усилитель для температурной стабилизации.

Схема замещения такого усилителя для слабых сигналов в линейном приближении (рис. 4.1, б) составлена на основе схемы замещения транзистора, приведенной в лабораторной работе 3, с добавлением резистивных элементов  $R_{к1}$ ,  $R_{к2}$ ,  $R_n$  и емкостных элементов  $C_{с1}$ ,  $C_{с2}$ ,  $C_0$  и  $C_n$ . Транзисторы  $T_1$  и  $T_2$  выбраны однотипными, поэтому на схеме замещения их  $h$ -параметры обозначены одинаково.

Пунктиром на схеме замещения показаны резистивные элементы  $R_6$  и  $R' = R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$ , включенные параллельно входным цепям транзисторов первого и второго каскадов. Так как  $R_6 \gg h_{11}$  и  $R' \gg h_{11}$ , то эти элементы при анализе работы усилителя можно не учитывать. Элементы  $R_6$  и  $C_n$  в схеме замещения усилителя можно не учитывать, так как падения напряжения на них от переменной составляющей тока незначительны. Емкость  $C_0$  равна сумме выходной емкости первого каскада, входной емкости второго каскада и емкости монтажа:

$$C_0 = C_{вых1} + C_{вх2} + C_m. \quad (4.1)$$

Емкость  $C_n$  равна сумме емкости конденсатора  $C_n$ , выходной емкости второго каскада  $C_{вых2}$  и емкости монтажа:

$$C_n' = C_n + C_{вых2} + C_m. \quad (4.2)$$

Выходная емкость усилительного каскада определяется емкостью промежутка коллектор — эмиттер:

$$C_{вых} = C_{кэ}. \quad (4.3)$$

Входная емкость второго каскада учитывает связь выходной цепи второго каскада с его входной цепью через  $p$ - $n$ -переход коллектор — база транзистора  $T_2$ , обладающий емкостью  $C_{кб2}$ :

$$C_{вх2} = C_{кб2} (1 + K_2), \quad (4.4)$$

где  $K_2$  — коэффициент усиления второго каскада. Величина емкостей  $C_{вх}$  и  $C_{вых}$  составляет десятки или сотни пикофарад.

Качество работы усилителя определяется амплитудной и частотной характеристиками.

Амплитудная характеристика усилителя  $U_{вых} = f(U_{вх})$  (рис. 4.2) линейна при малых входных напряжениях. Ее угол наклона определяет коэффициент усиления:

$$K_U = U_{вых} / U_{вх} = (U_{вых1} / U_{вх}) (U_{вых} / U_{вх2}) = K_1 K_2, \quad (4.5)$$

где  $K_1$  и  $K_2$  — коэффициенты усиления первого и второго каскадов соответственно ( $U_{вых1} = U_{вх2}$ ).

Линейная часть характеристики ограничена значением  $U_{вх}'$ . Если  $U_{вх} < U_{вх}'$ , то на выходе усилителя имеется усиленное напряжение  $U_{вых} = K U_{вх}$ . Если входное напряжение превышает  $U_{вх}'$ , то



из-за нелинейности характеристик транзисторов форма выходного напряжения искажается. При этом схемой замещения рис. 4.1, б пользоваться уже нельзя. В этом случае анализ работы усилителя проводят графически, используя входные и выходные характеристики транзистора.

*Амплитудно-частотной характеристикой усилителя* называется зависимость коэффициента усиления усилителя от частоты усиливаемого напряжения (рис. 4.3).

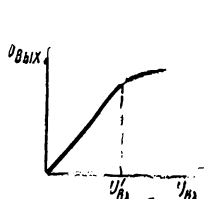


Рис. 4.2. Амплитудная характеристика усилителя

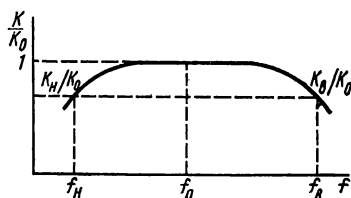


Рис. 4.3. Амплитудно-частотная характеристика усилителя

Для усилителя рис. 4.1 выражение для коэффициента усиления по напряжению каждого каскада имеет вид

$$\tilde{K} = \frac{K_0}{1 + j(\omega\tau_B - 1/\omega\tau_H)}, \quad (4.6)$$

$K_0 \approx h_{21}R_{в\text{ых}}R_{в\text{х}}/R_{в\text{х}}(R_{в\text{х}} + R_{в\text{ых}})$  — коэффициент усиления по напряжению каскада на средних частотах;  $\tau_B$  — постоянная времени усилительного каскада на верхних частотах:

$$\tau_{B1} = C_0 R_{в\text{х}1} R_{в\text{х}2} / (R_{в\text{х}1} + R_{в\text{х}2}), \quad \tau_{B2} = C'_H R_{в\text{ых}2} R_H / (R_{в\text{ых}2} + R_H); \quad (4.7)$$

$\tau_H$  — постоянная времени усилительного каскада на нижних частотах:

$$\tau_{H1} = C_{c1} (R_{в\text{ых}1} + R_{в\text{х}2}), \quad \tau_{H2} = C_{c2} (R_{в\text{ых}2} + R_H), \quad (4.8)$$

$R_{в\text{х}}$ ,  $R_{в\text{ых}}$  — входное и выходное сопротивления усилительных каскадов [см. формулы (3.4) и (3.5)].

Обычно рассматривают нормированную амплитудно-частотную характеристику усилительного каскада (рис. 4.3):

$$\frac{K}{K_0} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\omega\tau_B - \frac{1}{\omega\tau_H}\right)^2}}. \quad (4.9)$$

В широкой полосе частот коэффициент усиления имеет почти постоянное значение  $K_0$ , соответствующее коэффициенту усиления на средней частоте:

$$f_0 = 1/(2\pi\sqrt{\tau_H\tau_B}). \quad (4.10)$$

Уменьшение коэффициента усиления в области низших и высших частот связано с частотными искажениями. При усилении несинусоидальных сигналов отдельные составляющие их усиливаются по-разному из-за неравномерности частотной характеристики и поэтому форма усиленного сигнала на выходе усилителя отличается от формы сигнала на его входе. Уменьшение коэффициента усиления оценивается коэффициентами частотных искажений  $M_H$  и  $M_B$  в области нижних и верхних частот:

$$M_H = K_0/K_H, M_B = K_0/K_B. \quad (4.11)$$

Частоты  $f_H$  и  $f_B$ , на которых коэффициенты частотных искажений достигают допустимого значения, называют границами полосы пропускания усилителя в области нижних ( $f_H$ ) и верхних ( $f_B$ ) частот. В зависимости от назначения усилителя допустимое значение для  $M_H$  и  $M_B$  может находиться в пределах  $1,02 \div 1,5$ , чаще всего его принимают равным  $\sqrt{2}$ . При этом граничные частоты  $f_H$  и  $f_B$  могут быть рассчитаны по формулам

$$f_H = 1/(2\pi\tau_H), f_B = 1/(2\pi\tau_B). \quad (4.12)$$

Для усилителей с резистивно-емкостной связью полоса пропускания простирается обычно от  $20 \div 100$  Гц до  $15 \div 20$  кГц.

Уменьшение коэффициента усиления в области нижних частот связано с увеличением сопротивления конденсаторов связи  $C_{c1}$  и  $C_{c2}$  по сравнению с входным сопротивлением второго каскада  $R_{вх2}$  и сопротивлением нагрузочного резистора  $R_H$ .

При уменьшении частоты ( $f \rightarrow 0$ ) емкостное сопротивление конденсатора связи  $C_{c1} (1/2\pi f C_{c1} \rightarrow \infty)$  становится намного больше, чем  $R_{вх2}$ , поэтому  $U_{вх1} = U_{вх2} \rightarrow 0$  при  $f \rightarrow 0$ , что автоматически уменьшает напряжение на выходе второго каскада. Аналогично действие конденсатора  $C_{c2}$ . Кроме того, при уменьшении частоты увеличивается падение напряжения от переменной составляющей тока на резисторе  $R_B$  вследствие уменьшения шунтирующего действия конденсатора  $C_B$ . Это увеличивает отрицательную обратную связь и приводит к уменьшению выходного напряжения второго каскада.

В области верхних частот коэффициент усиления уменьшается вследствие шунтирующего действия емкостных элементов  $C_0$  (для первого каскада) и  $C_H'$  (для второго каскада). Сопротивление емкостного элемента  $C_0 (1/2\pi f C_0)$ , включенного параллельно входной цепи второго каскада, уменьшается при возрастании частоты. Это ведет к уменьшению выходного напряжения первого каскада, а значит, и выходного напряжения второго каскада. Аналогичное влияние оказывает емкостной элемент  $C_H'$ , включенный параллельно нагрузочному резистору  $R_H$ , на коэффициент усиления второго каскада.

Учитывая (4.5) и (4.9), легко построить частотную характеристику двухкаскадного усилителя. Полоса пропускания многокаскадного усилителя всегда уже полосы пропускания каждого из каскадов.

Большое значение при рассмотрении многокаскадных усилителей имеет вопрос согласования источника сигнала, каскадов усилителя и нагрузочного устройства.

Из рис. 4.1, б видно, что входное сопротивление второго каскада уменьшает эквивалентное выходное сопротивление первого каскада, а значит, и его коэффициент усиления. Если на «холостом ходу»

( $R_{вх2} \rightarrow \infty$ ) коэффициент усиления первого каскада  $K_{U1x.x}$  достигает 100 и более, то при подключении второго каскада это значение уменьшается в несколько раз.

При работе с высокоомными преобразователями первым каскадом усилителя обычно служит усилитель с общим коллектором (эмиттерный повторитель). Обладая большим входным и малым выходным сопротивлениями, он позволяет согласовать высокоомный преобразователь с небольшим входным сопротивлением усилительного каскада с общим эмиттером.

В данной работе исследуются основные характеристики двухкаскадного транзисторного усилителя, а также возможности использования многокаскадного усилителя для усиления сигналов, полученных от высокоомного преобразователя.

## **ОПИСАНИЕ ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ ПАНЕЛИ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ**

Лабораторная работа выполняется с использованием той же испытательной панели, что и лабораторная работа 3 (см. рис. 3.9).

Двухкаскадный транзисторный усилитель, изображенный на рис. 4.1, собирается на транзисторах  $T_1$  и  $T_2$  с использованием закрепленных рядом резисторов и конденсаторов.

Транзистор  $T$  используется для построения усилительного каскада с общим коллектором (см. рис. 3.8). Назначение остальных элементов, показанных на схеме испытательной панели, указано в описании лабораторной работы 3.

## **ЗАДАНИЕ**

А. Выполняется при подготовке к работе

Рассчитать значение граничных частот полосы пропускания первого каскада усилителя  $f_n$  и  $f_v$  ( $C_0 = 5000$  пФ). Значения входного и выходного сопротивлений усилительного каскада взять из результатов работы 3. Значения сопротивлений резисторов в цепи коллектора  $R_k$  и величины емкостей конденсаторов связи  $C_c$  приведены в табл. 3.2.

Б. Выполняется в лаборатории

1. Собрать усилительные каскады с общим эмиттером (по схеме ОЭ) на транзисторах  $T_1$  и  $T_2$  и измерить их коэффициенты усиления по напряжению  $K_1$  и  $K_2$  на частоте  $f = 1$  кГц при  $U_{вх} = 5$  мВ.

2. Собрать двухкаскадный усилитель по схеме ОЭ—ОЭ и измерить его коэффициент усиления  $K_U$  при  $f=1$  кГц и  $U_{вх}=1$  мВ. Сравнить со значением коэффициента усиления, получающимся по данным п. 1.

3. Определить полосу пропускания двухкаскадного усилителя ОЭ—ОЭ.

4. Определить влияние емкостей конденсатора связи  $C_{с2}$ , конденсаторов  $C_H$  и  $C_B$  на полосу пропускания и коэффициент усиления усилителя.

5. Исследовать работу усилителя (ОЭ—ОЭ) с высокоомным источником сигнала ( $r_{вн}=1,5$  кОм). Измерить напряжение на выходе усилителя при частоте входного напряжения  $f=1$  кГц и  $U_{вх}=1$  мВ.

6. Включить на входе усилителя ОЭ—ОЭ каскад с общим коллектором и вновь измерить напряжение на выходе трехкаскадного усилителя ОК—ОЭ—ОЭ. Объяснить расхождение с результатом, полученным в п. 5.

#### МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

а) Усилительный каскад с общим эмиттером на транзисторе  $T_1$  был исследован в лабораторной работе 3. В данной работе необходимо проверить значение его коэффициента усиления по методике, описанной в работе 3.

Второй каскад усиления собирается на транзисторе  $T_2$  по схеме, изображенной на рис. 3.7. Измерение коэффициента усиления производится таким же образом, как и для каскада на транзисторе  $T_1$ .

б) Двухкаскадный усилитель собирается по схеме рис. 4.1. Напряжение с выхода звукового генератора подается на вход первого каскада. Определив коэффициент усиления  $K_0=U_{вых}/U_{вх}$ , объясните расхождение со значением, полученным по формуле (4.5).

в) Полосу пропускания двухкаскадного усилителя находят при  $U_{вх}=1$  мВ по методике, изложенной в работе 1.

г) При выполнении п. 4 задания вместо конденсатора  $C'_{с2}$  включить  $C''_{с2}=0,25$  мкФ и, убедившись, что максимальное значение выходного напряжения  $U_{вых макс}$  в полосе пропускания осталось тем же, что и ранее, определить новые значения нижней и верхней граничных частот. Определив  $f_H$  и  $f_B$ , восстановить  $C''_{с2}$ .

Чтобы выяснить, каково влияние емкости конденсатора  $C_H$  на полосу пропускания, необходимо параллельно резистору  $R_H$  включить конденсатор  $C_H = 0,025$  мкФ. Убедившись, что  $U_{\text{вых макс}}$  не изменилось, определить новые значения  $f_H$  и  $f_B$ , после чего отключить  $C_H$ . Отключив конденсатор  $C_B$ , определить максимальное значение коэффициента усиления и полосу пропускания.

При отключении конденсатора  $C_B$  во втором каскаде усилителя начинает действовать отрицательная обратная связь, что уменьшает коэффициент усиления и расширяет полосу пропускания усилителя как в области верхних, так и в области нижних частот.

д) Чтобы исследовать работу усилителя с высокоомным источником входного напряжения, следует включить последовательно с конденсатором  $C_1$  переменный резистор  $R$ , имитирующий внутреннее сопротивление источника сигнала (см. рис. 3.9). Установить  $R = 1500$  Ом. На частоте  $f = 1$  кГц при напряжении на выходе звукового генератора 1 мВ измерить выходное напряжение усилителя и определить коэффициент усиления. Объяснить отличие найденного значения от величины коэффициента усиления, полученного в п. 2.

е) Включить после высокоомного источника сигнала эмиттерный повторитель, напряжение с выхода эмиттерного повторителя подать на двухкаскадный усилитель ОЭ-ОЭ и, измерив выходное напряжение полученного трехкаскадного усилителя, рассчитать его коэффициент усиления. Объяснить возрастание коэффициента усиления при включении эмиттерного повторителя, коэффициент усиления которого меньше 1.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В каких случаях используют многокаскадные усилители?
2. Каким образом осуществляется связь между каскадами в многокаскадном усилителе?
3. Почему не учитывается влияние резистора  $R_6$  в схеме замещения, приведенной на рис. 4.1, б?
4. Что такое амплитудная характеристика усилителя?
5. Для каких значений входных напряжений ( $U_{\text{вх}} > U'_{\text{вх}}$ ,  $U_{\text{вх}} < U'_{\text{вх}}$ ) справедлива схема замещения, приведенная на рис. 4.1, б?
6. Можно ли рассчитать выходное напряжение усилителя по формуле  $U_{\text{вых}} = K U_{\text{вх}}$  для случая  $U_{\text{вх}} > U'_{\text{вх}}$  (см. рис. 4.2)?
7. Как определить выходное напряжение усилителя, если  $U_{\text{вх}} > U'_{\text{вх}}$  (см. рис. 4.2)?

8. Зависит ли коэффициент усиления многокаскадного усилителя от значений входных и выходных сопротивлений каскадов?

9. Как изменяется коэффициент усиления  $K_{\text{У}}$  усилителя при увеличении  $R_{\text{к1}}$  (см. рис. 4.1)?

10. Почему коэффициент усиления усилителя зависит от частоты?

11. Что такое амплитудно-частотная характеристика усилителя?

12. Чем определяется максимальное значение коэффициента усиления усилителя?

13. Почему уменьшается коэффициент усиления в области нижних частот?

14. Как изменится коэффициент усиления  $K_{\text{У}}$  в области нижних частот при увеличении емкости конденсаторов связи?

15. Как изменится коэффициент усиления  $K_{\text{У}}$  в области верхних частот при увеличении емкости конденсатора  $C_{\text{н}}$ ?

16. Как изменится коэффициент усиления усилителя при отключении конденсатора  $C_{\text{з}}$ ?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5

### ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

**Цель работы:** изучение основных характеристик усилителей медленно изменяющихся напряжений и методов повышения их стабильности.

#### КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Во многих измерительных устройствах и в устройствах автоматики требуется усиливать медленно изменяющиеся напряжения и токи. Например, при измерении температуры с помощью термопары сколько-нибудь заметные изменения напряжения на ее зажимах во многих случаях происходят через интервалы времени, превышающие минуты и даже часы.

Широко распространенные усилители с резистивно-емкостными связями оказываются совершенно непригодными для усиления таких сигналов, так как их коэффициент усиления падает практически до нуля при усилении напряжений частотой порядка единиц герц, что видно из амплитудно-частотной характеристики рис. 5.1 (для ясности зависимости на рисунке в области  $K/K_0=1$  несколько разнесены).

Очевидно, что в таких случаях нужны усилители, имеющие начальный участок амплитудно-частотной характеристики, изображенный сплошной линией на рис. 5.1. Усилители, обладающие такой амплитудно-частотной характеристикой, называются *усилителями медленно изменяющихся напряжений* или *усилителями постоянного тока* (УПТ).

Основное требование, предъявляемое к УПТ, такое же, как и ко всем другим типам усилительных устройств, — требование линейной зависимости выходного напряжения от входного. Это требование включает:

отсутствие выходного напряжения при входном напряжении, равном нулю;

изменение знака выходного напряжения при изменении знака входного;

отношение величины выходного напряжения к входному должно быть постоянной величиной.

Простейший транзисторный усилитель медленно изменяющихся напряжений (рис. 5.2) — это обычный усилительный каскад с общим эмиттером.

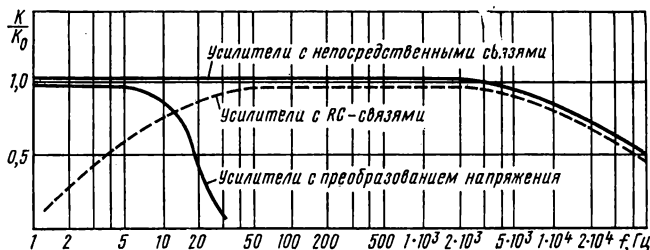


Рис. 5.1. Амплитудно-частотные характеристики усилителей с преобразованием напряжения и с непосредственными связями, а также усилителя с резистивно-емкостными связями

Нагрузочный резистор  $R_n$  подключен между коллектором транзистора  $T$  и средней точкой делителя напряжения  $R_1, R, R_2$ . Делитель позволяет компенсировать до нуля выходное напряжение при отсутствии входного, обеспечивая выполнение первых двух рассмотренных условий. Переменный резистор  $R$  позволяет производить подстройку в ходе эксплуатации усилителя, когда под влиянием изменения окружающих условий (например, температуры) компенсация может нарушиться.

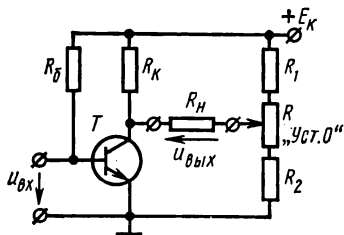


Рис. 5.2. Схема простейшего транзисторного усилителя медленно изменяющихся напряжений

Следует отметить, что в усилителе отсутствуют разделительные конденсаторы, из-за чего такие усилители называют *усилителями с непосредственными (гальваническими) связями*.

Третье условие в УПТ, так же как и в усилителях с  $RC$ -связями, обеспечивается выбором положения рабочей точки покоя на переходной характеристике тран-

зистора и диапазона величин усиливаемых напряжений. В том случае, когда входное напряжение меньше некоторого допустимого значения, выходное напряжение  $U_{вых} = KU_{вх}$ .

Один из существенных недостатков простейшего усилителя — небольшой коэффициент усиления. Использование для повышения коэффициента усиления нескольких таких каскадов затрудняется отсутствием общей точки входной и выходной цепей усилительного каскада, необходимой при создании многокаскадных усилителей.

Этот недостаток сравнительно просто удастся преодолеть, выбирая потенциал базы транзистора второго каскада равным потенциалу коллектора транзистора первого каскада (рис. 5.3).

Потенциал базы транзистора  $T_2$  второго усилительного каскада равен

$$\varphi_{62} = U_{62} + R_{32}I_{320}. \quad (5.1)$$

Он может быть изменен в довольно широких пределах за счет изменения сопротивления  $R_{32}$  и сделан равным потенциалу коллектора первого транзистора  $\varphi_{K1}$ :

$$\varphi_{K1} = U_{K1} = E_K - R_{K1}I_{K1}. \quad (5.2)$$

Таким образом, достигается равенство потенциалов точек  $a$  и  $b$ , т. е. потенциалов входных зажимов второго каскада и выходных зажимов первого. В этом случае точки  $a$  и  $b$  могут быть соединены без нарушения режимов первого и второго каскадов, и в результате

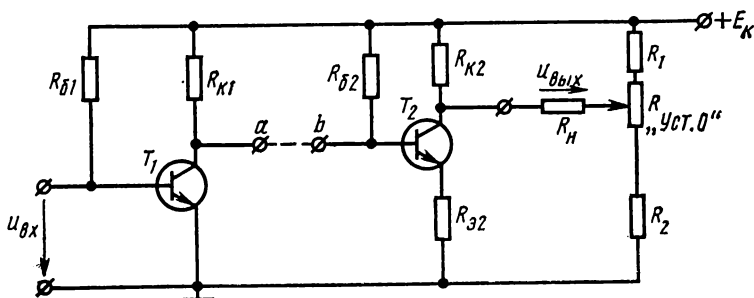


Рис. 5.3. Схема простейшего двухкаскадного усилителя медленно изменяющихся напряжений

будет получен двухкаскадный усилитель, коэффициент усиления которого определяется усилением первого и второго усилительных каскадов.

Чаще для того, чтобы получить общую точку входной и выходной цепей, используют два источника питания. Схема такого усилителя, который исследуется в лабораторной работе, приведена на рис. 5.4. Он содержит два усилительных каскада с общим эмиттером на транзисторах  $T_2$  и  $T_3$ . Установленный на выходе эмиттерный повторитель на транзисторе  $T_4$  снижает выходное сопротивление всего усилителя и практически устраняет погрешности измерений, вызванные шунтирующим влиянием измерительных приборов на усилитель. Входной эмиттерный повторитель на транзисторе  $T_1$  обеспечивает необходимый потенциал базы транзистора  $T_2$ . С помощью диода  $D_1$  осуществляется температурная стабилизация усилительного каскада.

Основным недостатком многокаскадного усилителя рассмотренного типа является значительное изменение выходного напряжения под влиянием изменений параметров транзисторов, сопротивлений резисторов и напряжения источника питания.



Если входное напряжение остается неизменным, а по какой-либо причине, например в результате изменения окружающей температуры, изменится сопротивление резистора  $R_{к2}$ , то это приведет к изменению потенциала коллектора транзистора  $T_2$  на величину

$$\Delta \varphi_{к2} = \Delta R_{к2} I_{к0}, \quad (5.3)$$

что эквивалентно появлению напряжения такой же величины на входе второго усилительного каскада, которое, будучи им усилено, приведет к изменению выходного напряжения. Это явление приводит к так называемому дрейфу нуля усилителя.

*Дрейф нуля* в УПТ — это изменение выходного напряжения усилителя при отсутствии изменений входного, происходящее под влиянием дестабилизирующих факторов, воздействующих на усилитель. Различные усилители сравнивают между собой по приведенному ко входу дрейфу нуля, определяемому как наибольшее изменение выходного напряжения под влиянием различных дестабилизирующих факторов, деленное на коэффициент усиления усилителя. Основной задачей при проектировании и эксплуатации усилителей медленно изменяющегося напряжения

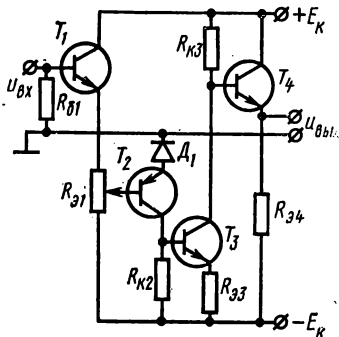


Рис. 5.4. Схема двухкаскадного усилителя с двумя источниками питания

является уменьшение дрейфа нуля. Существует несколько различных способов уменьшения дрейфа нуля, основными из которых являются:

- использование высокостабильных источников питания и всех элементов усилителя;
- применение балансных усилителей;
- применение усилителей с преобразованием напряжения.

Для того чтобы уменьшить влияние изменения внешних условий на весь усилитель, подбирают такие элементы, чтобы изменения их параметров были минимальными. К сожалению, этот способ оказывается трудно реализовать.

Принцип действия балансных усилителей основан на использовании свойств четырехплечего моста (рис. 5.5). Мост считается сбалансированным, если выходное напряжение равно нулю (и остается равным нулю при любых колебаниях напряжения питания). Легко показать, что условие сбалансированности эквивалентно равенству

$$R_1 R_2 = R_3 R_4. \quad (5.4)$$

Из этого соотношения следует, что если одинаковым образом изменяются сопротивления двух резисторов  $R_1$  и  $R_3$  (либо  $R_2$  и  $R_4$ ), то равновесие не нарушается. Это свойство моста и использовано при построении балансных усилителей. Если вместо резисторов  $R_2$  и  $R_4$  (реже вместо  $R_1$  и  $R_3$ ) установить усилительные элементы (транзисторы, электронные лампы), то получим *параллельный балансный*

каскад (рис. 5.6), если же усилительные элементы устанавливаются вместо резисторов  $R_1$  и  $R_4$  (или вместо  $R_2$  и  $R_3$ ), то *последовательный балансный каскад*.

В измерительных устройствах большее распространение получили параллельные балансные каскады. Правая и левая половины параллельного балансного каскада делаются одинаковыми т. е. устанавливают транзисторы  $T_1$  и  $T_2$  одного типа по возможности с одинаковыми характеристиками, сопротивления резисторов  $R_{K1}$  и  $R_{K2}$  (а также  $R_{B1}$  и  $R_{B2}$ ) выбирают одинаковыми. В результате режимы работы правой и левой половины усилителя будут одинаковы, следовательно, будут при отсутствии напряжений  $u_{BX1}$  и  $u_{BX2}$  одина-

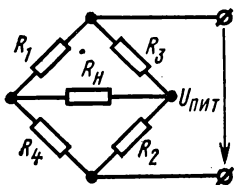


Рис. 5.5. Схема четырехплечего моста

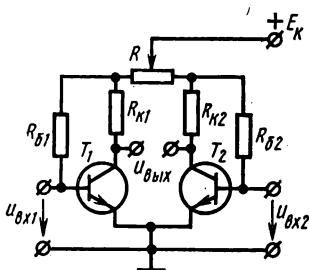


Рис. 5.6. Схема параллельного балансного каскада

ковы и потенциалы коллекторов транзисторов, а выходное напряжение будет равно нулю. Переменный резистор  $R$  служит для начальной балансировки усилителя. В случае некоторой неидентичности половин усилителя изменением положения движка резистора  $R$  удастся добиться равенства потенциалов коллекторов, т. е. отсутствия напряжения на выходе.

Если, например, на левый вход усилителя подать положительное напряжение, то коллекторный ток транзистора  $T_1$  возрастает и потенциал коллектора изменится, в результате на выходе появится напряжение. Если подать напряжение на второй вход усилителя, то потенциал коллектора транзистора  $T_2$  также изменится, а следовательно изменится и выходное напряжение.

Напряжение на выходе параллельного балансного каскада пропорционально разности двух входных напряжений. В частном случае, когда одно из этих напряжений равно нулю, выходное напряжение пропорционально входному.

Высокая стабильность балансных каскадов обеспечивается идентичностью двух половин усилителя. Для сохранения идентичности конструктивно выполняют каскад таким образом, чтобы все элементы и особенно транзисторы находились в одинаковых температурных условиях. В этом случае воздействие внешних дестабилизирующих факторов (главным образом температуры), оказываясь одинаковым для обеих половин усилителя, не влияет на выходное напряжение. Аналогично уменьшается и влияние питающего напряжения.

Усилители с непосредственными связями, обладая очень широкой частотной характеристикой, находят в последнее время разнооб-

разное применение. Позволяя усиливать как постоянное, так и переменное напряжение, они используются в качестве усилителей во многих измерительных устройствах, в том числе в осциллографах.

В последнее время созданы многокаскадные балансные усилители, построенные на основе интегральных микросхем. Весьма компактный монтаж, выполненный по чрезвычайно сложной технологии, позволил собрать в одном корпусе диаметром 8,5 и высотой 4,6 мм и массой 1,5 г усилитель с коэффициентом усиления 12 000. Благодаря одинаковому тепловому режиму всех элементов приведенной ко входу дрейф нуля не превышает единиц милливольт. Однако и эта

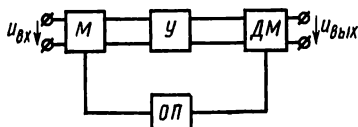


Рис. 5.7. Структурная схема усилителя с преобразованием напряжения

величина велика, поэтому в таких усилителях обязательно используют цепи обратной связи, снижающие дрейф до еще меньших значений, хотя при этом и уменьшается коэффициент усиления.

Однако при некоторых особо точных измерениях, когда допустимый дрейф составляет единицы микровольт, и такие характеристики оказываются недостаточными. В этом случае

используют усилители с преобразованием напряжения. Эти усилители построены по схеме модулятор — усилитель — демодулятор (рис. 5.7). В этих усилителях вначале происходит преобразование медленно изменяющегося напряжения в переменное (модулятором  $M$ ), которое усиливается усилителем переменного напряжения  $У$ , практически не имеющим дрейфа, так как очень медленные изменения напряжения не пропускаются конденсаторами связи, а значит, и не усиливаются. При изменении величины входного медленно изменяющегося напряжения изменяется и величина переменного напряжения на выходе модулятора. При изменении же знака входного напряжения фаза преобразованного напряжения изменяется на  $180^\circ$ .

Для модуляторов применяют механические вибропреобразователи и полупроводниковые устройства. Малая частота переключения (обычно не более 400 Гц) механических преобразователей ограничивает диапазон частот усиливаемых напряжений. Эти недостатки устраняют применение полупроводниковых ключевых схем (хотя это и приводит к некоторому возрастанию дрейфа).

Переменное напряжение с выхода модулятора  $M$ , усиленное усилителем переменного напряжения  $У$ , поступает на демодулятор  $ДМ$ , устройство которого аналогично устройству модулятора. Управляется демодулятор тем же источником опорного напряжения  $ОП$ , что и модулятор, поэтому в тот момент, когда входной сигнал проходит через модулятор, он проходит и через демодулятор. Если при этом изменяется знак входного сигнала, то знак напряжения на выходе усилителя также изменится. Применение в качестве преобразователя переменного напряжения на выходе усилителя в постоянное обычно выпрямителя не позволило бы получать выходное напряжение разной полярности и в этом случае не было бы выполнено условие, предъявляемое ко всем УПТ.

Усилители с преобразованием напряжения применяются относительно редко (они находят применение только в прецизионной ап-

паратуре) из-за их сложности и узкой полосы пропускания (подробнее см. работу 13).

Амплитудно-частотная характеристика УПТ с преобразованием напряжения приведена на рис. 5.1.

### ОПИСАНИЕ ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ ПАНЕЛИ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

В центральной части испытательной панели (рис. 5.8) размещены исследуемые усилители УПТ-1 и УПТ-2. Первый усилитель содержит два усилительных каскада

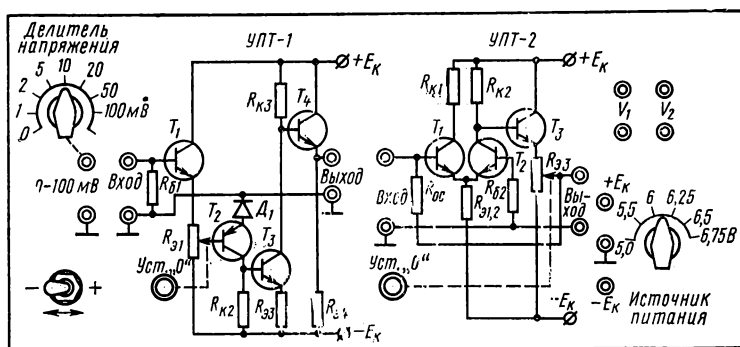


Рис. 5.8. Испытательная панель лабораторного стенда

и эмиттерные повторители на входе и выходе. Второй — балансный усилитель, тоже с эмиттерным повторителем на выходе. Эмиттерный повторитель на выходе усилителя имеет низкое выходное сопротивление, что позволяет не предъявлять жестких требований к сопротивлениям измерительных приборов. На панели приведена упрощенная схема этого усилителя. Оба усилителя полностью собраны, напряжение питания к ним подведено. Ручки установки нуля «Уст. 0» размещены в нижней части усилителей. Для исследования усилителей необходимо подать входное напряжение и подключить измерительный прибор к выходным клеммам.

В правой верхней части испытательной панели расположены входные клеммы вольтметров  $V_1$  и  $V_2$ , установленных на стенде. Вольтметр  $V_1$  используется для измерения выходного напряжения. Вольтметр  $V_2$  предназначен для измерения напряжения питания усилителей.

Переключатели пределов измерения расположены вблизи приборов вне испытательной панели.

В левой части панели — калиброванный делитель напряжения с переключателем. Делитель подключен к источнику питания, полярность которого изменяется тумблером, расположенным ниже переключателя. При исследовании входные зажимы усилителей необходимо соединить с клеммами калиброванного делителя.

Два источника питания в правой части панели подключены к усилителям. Регулятором одновременно изменяются (от 5,0 до 6,75 В) напряжения обоих источников, выведенные на клеммы  $+E_k$ ,  $\perp$ ,  $-E_k$ , так что величины положительного и отрицательного напряжений всегда равны друг другу. Вольтметром  $V_2$  измеряют одно из этих напряжений.

В работе используется генератор ГЗ-36, расположенный в левой части стенда (вне рабочей панели). С целью уменьшения помех выходные зажимы генератора не выведены на испытательную панель и он подключается специальным шлангом.

### ЗАДАНИЕ

А. Выполняется при подготовке к работе

1. Сделать заготовку для построения амплитудно-частотной характеристики. Для этого по оси абсцисс отложить частоты в логарифмическом масштабе от 1 Гц до 20 кГц.

2. Изобразить схему двухкаскадного УПТ с включенными источником входного напряжения и измерительными приборами.

3. Изобразить схему параллельного балансного УПТ с включенными источниками питания, источником входного напряжения и измерительными приборами.

Б. Выполняется в лаборатории

1. Установить номинальное напряжение питания  $U_{пит}=6$  В. Подключить цифровой вольтметр к выходу двухкаскадного усилителя и добиться отсутствия напряжения на выходе усилителя.

2. При номинальном напряжении питания снять амплитудную характеристику усилителя, подавая на вход отрицательное напряжение с калиброванного делителя.

Проверить, как изменится коэффициент усиления при изменении знака входного напряжения. По результатам измерений построить амплитудную характеристику.

3. Уменьшая напряжение питания усилителя, определить изменения коэффициента усиления при одном из значений отрицательного входного напряжения, используемых в п. 2.

4. Определить дрейф нуля на выходе усилителя при уменьшении напряжения питания на 0,25 и 0,5 В. Вычислить приведенный ко входу дрейф нуля, вызванный изменением напряжения питания.

5. Установить номинальное напряжение питания и определить коэффициент усиления усилителя, подавая на вход усилителя переменное напряжение частотой 20, 50, 100, 500 Гц, 2, 10 и 20 кГц от генератора ГЗ-36. По результатам измерений построить амплитудно-частотную характеристику усилителя.

6. Установить номинальное напряжение питания, подключить вольтметр  $V_1$  к выходу балансного УПТ и добиться отсутствия выходного напряжения. Выполнить измерения и расчеты, указанные в п. 2÷4.

#### **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ**

а) Цифровой вольтметр  $V_2$  подключается к источнику питания. Вольтметр может быть подключен к шинам  $+E_k$  и  $\perp$ , либо к  $-E_k$  и  $\perp$ . Предел измерения вольтметра устанавливается на 10 В при выполнении всей работы. Это нужно для того, чтобы избежать погрешностей, которые могут появиться при переключении пределов измерения.

Установка нуля производится с помощью ручки «Уст. 0» при отсутствии входного напряжения.

б) Коэффициент усиления необходимо определить при нескольких значениях входного напряжения. При больших значениях напряжения коэффициент усиления начнет уменьшаться вследствие нелинейности характеристик транзисторов.

Измерять коэффициент усиления при малых значениях входного напряжения  $U_{вх}$ , соизмеримых с дрейфом нуля, нельзя из-за большой погрешности определения коэффициента усиления. Проверить, как изменится коэффициент усиления при изменении полярности входного напряже-

ния можно, изменяя знак напряжения, снимаемого с калиброванного делителя.

в) Изменение напряжения питания проводится при отсутствии входного напряжения, затем устанавливается нуль выходного напряжения. После этого, подав входное напряжение, определяется коэффициент усиления. Повторная установка нуля позволяет устранить погрешность, которая может возникнуть из-за неравенства напряжений источников.

г) Перед выполнением п. 4 задания следует проверить установку нуля при номинальном напряжении питания  $U_{\text{пит}} = 6$  В. Входное напряжение переключателем калиброванного делителя устанавливается равным нулю. Изменяя напряжение питания от 5,5 до 6,5 В, записать изменения выходного напряжения.

Дрейф нуля, приведенный ко входу, определяется отношением значения напряжения дрейфа на выходе усилителя к коэффициенту усиления. Следует учесть, что коэффициент усиления должен быть взят соответствующим режиму измерения.

д) При измерении коэффициента усиления переменных напряжений вольтметр  $V_1$  должен быть переключен на измерение переменного напряжения. Входное напряжение подается такое же, как и в п. 2, и отсчитывается по шкале генератора ГЗ-36, установленного в левой части стенда. Амплитудно-частотная характеристика представляет собой зависимость коэффициента усиления от частоты. При построении этой характеристики частоту по оси абсцисс обычно откладывают в логарифмическом масштабе, для того чтобы при большом диапазоне изменения частоты получить достаточно крупный масштаб в области низких частот. По оси ординат удобно для сопоставления различных типов усилителей откладывать величину  $K/K_0$ , где  $K_0$  — коэффициент усиления в области средних частот. Для используемых в работе усилителей эти частоты составляют  $1 \div 2$  кГц.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какого типа сигналы усиливают УПТ?
2. Каким основным условиям должны удовлетворять усилители медленно изменяющихся напряжений?
3. Как изменяется напряжение на выходе УПТ при изменении знака входного напряжения?
4. Что такое дрейф нуля?

5. Для чего нужен делитель напряжения  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R$  в однокаскадном УПТ?
6. При каких условиях могут быть соединены между собой два усилительных каскада УПТ?
7. Что такое параллельный балансный каскад?
8. Что такое последовательный балансный каскад?
9. Для чего нужен переменный резистор в балансном УПТ?
10. Почему дрейф нуля балансного УПТ меньше, чем в обычном усилителе?
11. Как вычисляется приведенный ко входу дрейф нуля?
12. С какой целью используют два источника питания в усилителях медленно изменяющихся напряжений?
13. С какой целью используют модулятор в УПТ с преобразованием напряжения?
14. Почему усилитель переменного напряжения не имеет дрейфа?
15. Может ли УПТ усиливать переменное напряжение?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 6

### ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ В УСИЛИТЕЛЯХ

**Цель работы:** изучение влияния цепей обратной связи на характеристики усилителей.

#### КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

*Обратной связью* называется передача части энергии с выхода усилителя на вход (рис. 6.1). Из выходной цепи во входную энергия подается через цепь обратной связи с коэффициентом передачи  $\tilde{\beta}$ . Обратная связь называется *положительной*, если передаваемый ею с выхода на вход сигнал (в усилителях обычно напряжение) складывается с входным сигналом, и *отрицательной*, если вычитается.

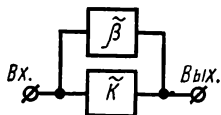


Рис. 6.1. Структурная схема усилительного устройства с обратной связью

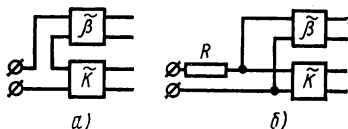


Рис. 6.2. Структурные схемы входной цепи усилителя с последовательной (а) и параллельной (б) обратными связями

Если источник усиливаемого напряжения и выходные зажимы цепи обратной связи соединены последовательно, то имеет место *последовательная обратная связь* (рис. 6.2, а), если параллельно, то *параллельная обратная связь* (рис. 6.2, б). При параллельной обратной связи во входную цепь включается резистор, предотвращающий шунтирование цепи обратной связи источником входного напряжения.



В усилителе осуществляется *обратная связь по напряжению*, если напряжение, подаваемое на вход цепи обратной связи, снимается с зажимов нагрузочного резистора (рис. 6.3, а). Если напряжение обратной связи снимается с резистора  $R_{oc}$ , включенного последовательно с нагрузочным резистором  $R_H$ , то оно пропорционально току  $\dot{I}_H$  (рис. 6.3, б). В этом случае имеет место *обратная связь по току*.

В усилительных устройствах наиболее употребительны различные виды отрицательной, а в генераторных устройствах — положительной обратной связи.

Обратная связь оказывает очень большое влияние практически на все характеристики усилителя. Рассмотрим в качестве примера действие последовательной обратной связи по напряжению. Струк-

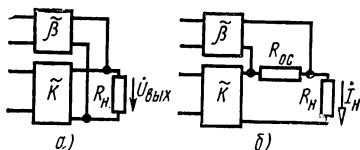


Рис. 6.3. Структурные схемы выходной цепи усилителя с обратной связью по напряжению (а) и по току (б)

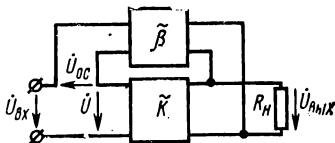


Рис. 6.4. Структурная схема усилителя, охваченного последовательной обратной связью по напряжению

турная схема усилителя, охваченного последовательной обратной связью по напряжению, показана на рис. 6.4. Пусть усилитель имеет входное сопротивление  $Z_{вх} = \dot{U} / \dot{I}_{вх}$  и коэффициент усиления  $K = \dot{U}_{вых} / \dot{U}$ . Коэффициент передачи цепи обратной связи  $\tilde{\beta} = \dot{U}_{oc} / \dot{U}_{вых}$ . Требуется определить аналогичные характеристики ( $Z_{вх, oc} = \dot{U}_{вх} / \dot{I}_{вх}$  и  $\tilde{K}_{oc} = \dot{U}_{вых} / \dot{U}_{вх}$ ) усилительного устройства с обратной связью. Согласно второму закону Кирхгофа, для входной цепи усилителя справедливо соотношение

$$\dot{U} = \dot{U}_{вх} + \dot{U}_{oc} \text{ или } \dot{U}_{вх} = \dot{U} - \dot{U}_{oc}. \quad (6.1)$$

Подставляя значение  $\dot{U}_{вх}$  в выражение для коэффициента усиления, получаем

$$\tilde{K}_{oc} = \dot{U}_{вых} / (\dot{U} - \dot{U}_{oc}) = \dot{U}_{вых} / (\dot{U} - \dot{U}_{вых} \tilde{\beta}) = \dot{U}_{вых} / \dot{U} (1 - \tilde{\beta} \dot{U}_{вых} / \dot{U}), \quad (6.2)$$

откуда находим значение коэффициента усиления усилителя, охваченного обратной связью:

$$\tilde{K}_{oc} = \tilde{K} / (1 - \tilde{K} \tilde{\beta}). \quad (6.3)$$

Чаще всего рассматривают случай действительных коэффициентов  $K$  и  $\beta$ , т. е. когда как в самом усилителе, так и в цепи обратной связи отсутствуют фазовые сдвиги, что соответствует области средних частот. В этом случае при положительной обратной связи  $U = U_{вх} + U_{oc}$  и выражение для коэффициента усиления усилителя имеет вид

$$K_{oc} = K / (1 - K \beta). \quad (6.4)$$

При отрицательной обратной связи  $U = U_{вх} - U_{ос}$  и коэффициент усиления определяется выражением

$$K_{ос} = K / (1 + K\beta). \quad (6.5)$$

Таким образом, коэффициент усиления усилителя, охваченного положительной обратной связью, возрастает, а усилителя, охваченного отрицательной обратной связью, уменьшается. Степень изменения коэффициента усиления зависит от величины  $K\beta$ , которая называется *глубиной обратной связи*.

При  $K\beta \gg 1$  нелинейные искажения в усилителе становятся настолько большими, что расчет коэффициента усиления без их учета по формуле (6.4) становится невозможным.

Теперь рассмотрим, как обратная связь влияет на входное сопротивление усилителя. Используя уравнение (6.1) для входной цепи усилителя, охваченного обратной связью, получим

$$Z_{вх.ос} = \frac{\dot{U}_{вх}}{\dot{I}_{вх}} = \frac{\dot{U} - \dot{U}_{ос}}{\dot{I}_{вх}} = \frac{\dot{U} - \dot{U}_{вх}\tilde{\beta}}{\dot{I}_{вх}} = \frac{\dot{U}(1 - \tilde{K}\tilde{\beta})}{\dot{I}_{вх}}. \quad (6.6)$$

Таким образом, с учетом того, что входное сопротивление усилителя без обратной связи  $Z_{вх} = \dot{U} / \dot{I}_{вх}$ , получим

$$Z_{вх.ос} = Z_{вх}(1 - \tilde{K}\tilde{\beta}). \quad (6.7)$$

Если не учитывать влияние реактивных сопротивлений в усилителе, то при положительной обратной связи входное сопротивление уменьшается:

$$R_{вх.ос} = R_{вх}(1 - K\beta), \quad (6.8)$$

а при отрицательной обратной связи входное сопротивление увеличивается:

$$R_{вх.ос} = R_{вх}(1 + K\beta). \quad (6.9)$$

Можно показать, что при отрицательной обратной связи выходное сопротивление уменьшается в  $1 + K\beta$  раз, что позволяет использовать усилитель с отрицательной обратной связью при работе с низкоомным нагрузочным устройством.

Однако наибольшим достоинством отрицательной обратной связи, обеспечившим ей весьма широкое распространение, является повышение стабильности основных характеристик усилительных устройств.

Если  $\delta K$  — относительная величина нестабильности коэффициента усиления усилителя, равная  $\Delta K / K$ , где  $\Delta K$  — абсолютная величина нестабильности, то относительная величина нестабильности коэффициента усиления усилителя, охваченного отрицательной обратной связью, будет равна

$$\begin{aligned} \delta K_{ос} &= \frac{\Delta K_{ос}}{K_{ос}} = \frac{(K + \Delta K) / [1 + (K + \Delta K)\beta] - K / (1 + K\beta)}{K / (1 + K\beta)} = \\ &= \frac{\Delta K / K}{1 + (K + \Delta K)\beta} \approx \frac{\delta K}{1 + K\beta}. \end{aligned} \quad (6.10)$$

Таким образом, нестабильность в результате воздействия отрицательной обратной связи уменьшается в  $1 + K\beta$  раз.

Интересно отметить, что при  $K\beta \gg 1$  коэффициент усиления усилителя, охваченного очень глубокой отрицательной обратной связью,

$$K_{oc} = K/(1 + K\beta) \approx 1/\beta \quad (6.11)$$

практически не зависит от коэффициента усиления самого усилителя и определяется только параметрами цепи обратной связи. Цепь обратной связи обычно состоит только из пассивных элементов и поэтому может быть сделана высокостабильной.

Таким образом, введение отрицательной обратной связи позволяет существенно улучшить характеристики усилителя: улучшить стабильность коэффициента усиления, увеличить входное и уменьшить выходное сопротивление, расширить полосу пропускания усилителя. Некоторое уменьшение коэффициента усиления легко может быть скомпенсировано введением дополнительного усилительного каскада.

Положительная обратная связь воздействует на характеристики усилителя противоположным образом, т. е. увеличивает нестабильность коэффициента усиления и т. д. Положительная обратная связь почти не используется в усилителях.

Широкое применение в усилителях нашла и параллельная обратная связь. Она часто применяется при построении функциональных (дифференцирующих, интегрирующих и т. п.) усилителей, используемых в аналоговых вычислительных машинах и системах автоматического регулирования (более подробно см. лабораторную работу 9).

## **ОПИСАНИЕ ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ ПАНЕЛИ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ**

На испытательной панели (рис. 6.5) размещены усилитель, цепь обратной связи, а также клеммы для подключения измерительных приборов, расположенных на стенде.

Усилитель полностью собран и к нему подведено питание. На испытательную панель выведены его входные и выходные зажимы, а также ручка регулятора коэффициента усиления, позволяющая изменять коэффициент усиления от 80 до 120. На испытательную панель выведены также входные и выходные зажимы цепи обратной связи и переключатель коэффициента передачи  $\beta$ . Переключателем изменяется коэффициент трансформации трансформатора, подключенного к цепи обратной связи. Это обеспечивает изменение коэффициента передачи  $\beta$ .

В работе используются вольтметры, установленные на стенде. Гнезда для их подключения расположены в левой верхней части испытательной панели. Кроме этих приборов используются вольтметр ВК7-13 для измерения вы-

ходных напряжений усилителя, осциллограф С1-68 для наблюдения формы выходного напряжения, источник — генератор синусоидальных напряжений ГЗ-36.

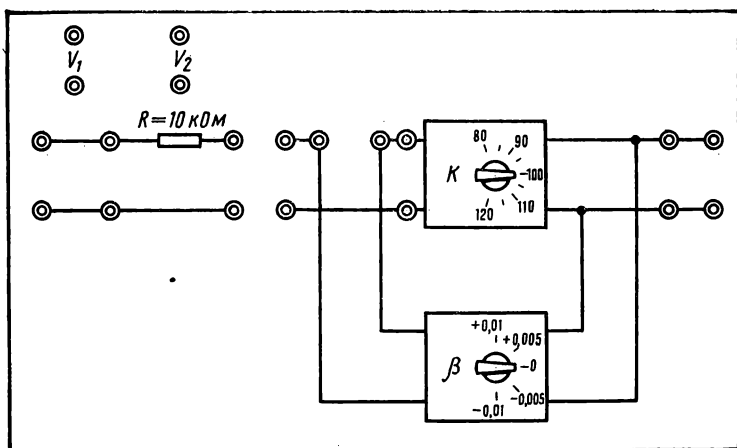


Рис. 6.5. Испытательная панель лабораторного стенда

### ЗАДАНИЕ

А. Выполняется при подготовке к работе

1. Рассчитать входное сопротивление  $R_{вх.ос}$  и коэффициент усиления  $K_{ос}$  усилителя с коэффициентом усиления  $K=100$ , охваченного последовательной обратной связью по напряжению для  $\beta = -0,01; -0,005; +0,005; +0,01$ , если  $R_{вх} = 10 \text{ кОм}$ .

2. Рассчитать относительную нестабильность коэффициента усиления  $\delta K_{ос}$  усилителя с последовательной обратной связью по напряжению, если  $K=100$ , а  $\Delta K = -10$  и  $\Delta K = +10$ ,  $\beta = -0,01; -0,005; +0,005; +0,01$ .

Б. Выполняется в лаборатории

1. Установить коэффициент усиления  $K$  равным 100 и измерить входное сопротивление  $R_{вх}$  усилителя, работающего на нагрузочный резистор  $R_{н}$ .

2. Включить последовательную обратную связь и для значений  $\beta = -0,01; -0,005; +0,005$  и  $+0,01$  определить

значения  $K_{ос}$ . Отметить момент перехода усилителя в режим самовозбуждения.

3. Измерить входное сопротивление усилителя с последовательной обратной связью для  $\beta = -0,01$ ;  $-0,005$ ;  $+0,005$  и  $+0,01$ .

4. Сравнить полученные в п. 2 и 3 значения  $K_{ос}$  и  $R_{вх.ос}$  с результатами расчетов, выполненных в соответствии с п. 1 раздела А задания.

5. Определить нестабильность коэффициента усиления  $\delta K_{ос}$  усилителя, охваченного отрицательной обратной связью при изменении коэффициента усиления усилителя  $K$  от 90 до 100 и от 100 до 110 для значений  $\beta = -0,01$  и  $-0,005$ . Сравнить полученные значения  $\delta K_{ос}$  с результатами расчета, выполненного в соответствии с п. 2 раздела А задания.

#### МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

а) Измерение коэффициента усиления усилителя производится при подаче на его вход напряжения 10 мВ частотой 10 кГц от генератора ГЗ-36 (по индикатору которого и производится отсчет этого напряжения).

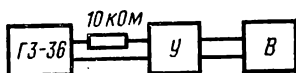


Рис. 6.6. Схема для измерения входного сопротивления усилителя

Выходное напряжение измеряется вольтметром ВК7-15. Обязательно обратите внимание на частоту входного напряжения, так как в цепи обратной связи использован трансформатор, рассчитанный для работы в указанном диапазоне частот. При

других частотах из-за изменения коэффициента трансформации и появления фазовых сдвигов будут получены результаты, значительно отличающиеся от полученных в разделе А задания.

Коэффициент усиления следует измерять при выполнении задания, а не просто устанавливать регулятор в нужное положение. На испытательной панели указаны лишь ориентировочные значения коэффициента усиления. Измерение входного сопротивления усилителя производится по схеме, приведенной на рис. 6.6. Напряжение  $U_r$  генератора подается на последовательно соединенные резистор с известным сопротивлением ( $R = 10 \text{ кОм}$ ) и на

входную цепь усилителя  $U$ . Поскольку измерения входного сопротивления проводят при известном коэффициенте усиления, то усилитель можно использовать в качестве измерительного устройства для определения входного напряжения, которое будет равно показанию  $U_B$  вольтметра  $B$ , деленному на коэффициент усиления, т. е.

$$U_{R_{вх}} = U_B / K_{oc}. \quad (6.12)$$

Ток входной цепи

$$I_{вх} = (U_r - U_{R_{вх}}) / R. \quad (6.13)$$

Следовательно, входное сопротивление усилителя

$$R_{вх} = \frac{U_{R_{вх}}}{I_{вх}} = \frac{U_{R_{вх}} R}{U_r - U_{R_{вх}}} = \frac{R U_B / K_{oc}}{U_r - U_B / K_{oc}}. \quad (6.14)$$

При измерении входного сопротивления усилителя целесообразно на выходе усилителя подключить осциллограф, чтобы все измерения проводить в пределах линейного участка динамической характеристики усилителя.

б) При определении момента перехода усилителя, охваченного положительной обратной связью, в режим самовозбуждения следует учитывать, что усиленное напряжение накладывается на генерируемое. Поскольку их частоты различны, то движущееся изображение на экране осциллографа будет «размытым». Уменьшив до нуля входное напряжение (просто отключить генератор нельзя, так как при этом будет разорвана входная цепь усилителя), можно наблюдать на экране осциллографа форму генерируемого сигнала.

в) При измерении входного сопротивления усилителя, охваченного обратной связью, следует учитывать изменение коэффициента усиления с изменением глубины обратной связи.

г) Результаты расчета и измерений  $K_{oc}$  и  $R_{вх, oc}$  необходимо свести в таблицу. Найти в ней наибольшее расхождение результатов расчета и измерений и для этого случая определить относительную величину этого расхождения.

д) В работе изменение характеристик усилителя под действием различных дестабилизирующих факторов моделируется изменением коэффициента усиления. Коэффициент усиления изменяется регулятором в пределах от 80 до 120. При изменении коэффициента усиления от зна-

чения  $K_U = 100$  до значений  $K'_U = 110$  и  $K''_U = 90$  неустойчивость коэффициента усиления  $\delta K = \Delta K / K = 0,1$ . Установив необходимый коэффициент усиления, нужно определить соответствующие значениям  $K_U$ ,  $K'_U$  и  $K''_U$  значения коэффициентов усиления  $K_{ос}$ ,  $K'_{ос}$  и  $K''_{ос}$  при включенной отрицательной обратной связи и рассчитать неустойчивость  $\delta K_{ос}$ .

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое обратная связь в усилителях?
2. Какие виды обратной связи вы знаете?
3. Какой вид обратной связи используется в генераторах?
4. Как изменяется коэффициент усиления с увеличением глубины отрицательной обратной связи?
5. Каковы достоинства отрицательной обратной связи?
6. Как изменяется коэффициент усиления с увеличением глубины положительной обратной связи?
7. При каких условиях происходит переход усилителя в режим самовозбуждения?
8. Каков режим работы усилителя при  $K\beta = 1$ ?
9. Как влияет последовательная обратная связь на входное сопротивление усилителя?
10. Как влияет отрицательная обратная связь на стабильность усилителя?
11. Как влияет положительная обратная связь на стабильность усилителя?
12. Как при выполнении работы измеряется входное сопротивление усилителя?
13. Как при выполнении работы определяется момент перехода усилителя в режим генерации?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 7

### ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ

**Цель работы:** изучение основных характеристик и схем усилителей мощности.

#### КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

*Усилителями мощности* называют усилительные каскады, к которым предъявляется требование получения в заданном нагрузочном устройстве необходимой мощности. Такие усилители работают обычно в режиме, соответствующем максимальному значению к. п. д.

Усилитель мощности должен обеспечить требуемую мощность при определенной величине сопротивления нагрузочного устройства  $R_n$  или  $Z_n$ . Это обстоятельство является решающим при выборе схем и режимов работы усилителя по постоянному и переменному току. Максимальная мощность в нагрузочном устройстве получается при

условии равенства выходного сопротивления активного двухполюсника и сопротивления нагрузочного резистора. Однако величина выходного сопротивления усилительного элемента может сильно отличаться от величины сопротивления нагрузочного устройства. Это противоречие может быть разрешено путем использования согласующего выходного трансформатора (рис. 7.1). Известно, что приведенное сопротивление нагрузочного резистора связано с коэффициентом трансформации следующим соотношением:

$$R'_H = (w_1/w_2)^2 R_H, \quad (7.1)$$

где  $w_1, w_2$  — число витков соответственно первичной и вторичной обмоток трансформатора;  $R_H$  — реальное значение сопротивления нагрузочного резистора.

Таким образом, если выбрать коэффициент трансформации выходного трансформатора из условия

$$k_T = w_1/w_2 = \sqrt{R_{\text{вых}}/R_H}, \quad (7.2)$$

где  $R_{\text{вых}}$  — выходное сопротивление усилительного элемента, то усилитель будет обеспечивать максимальную мощность при работе с нагрузочным резистором, имеющим сопротивление  $R_H$ .

В качестве усилителей мощности чаще других применяются транзисторные усилители с общим эмиттером (рис. 7.1). Эти усилители обеспечивают наибольшее усиление мощности по сравнению с другими типами усилителей.

Усилитель мощности определяет основные энергетические характеристики электронного аппарата в целом, поэтому первостепенное значение приобретает повышение коэффициента полезного действия усилителя мощности. Это достигается правильным выбором режимов работы усилительных элементов.

Поскольку в усилителе мощности желательно получать наибольшие значения переменных токов и напряжений, рабочая точка может попадать на участок характеристики, где могут проявляться нелинейные свойства усилительных элементов. Поэтому усилители мощности имеют наибольшие по сравнению с другими усилителями нелинейные искажения и это следует учитывать при их расчете и анализе их работы.

Коэффициент нелинейных искажений  $k_{н.н}$  определяется по формуле

$$k_{н.н} = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2} / U_1, \quad (7.3)$$

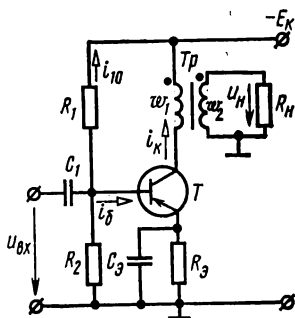


Рис. 7.1. Однотактный усилитель мощности с трансформаторным включением нагрузки



где  $U_n$  — действующее значение  $n$ -й гармонической составляющей выходного напряжения;  $U_1$  — действующее значение первой (основной) гармонической составляющей выходного напряжения.

*Класс усиления* или режим работы транзистора выбирается в зависимости от требований, предъявляемых к усилителю, и определяется положением рабочей точки в режиме покоя на переходной характеристике транзистора и величиной усиливаемого напряжения  $U_{вх}$ , т. е. значениями постоянных и переменных составляющих токов и напряжений. В зависимости от положения рабочей точки на характеристиках различают усилители мощности, работающие в режимах А, В и С.

Режим А характерен тем, что положение рабочей точки выбирают в середине линейного участка (т. е. А, А' и А'' на рис. 7.2). При работе в режиме В рабочая точка выбирается на границе линейного участка (точки N и N' на рис. 7.2) так, что токи транзистора в режиме покоя составляют:  $I_б=0$ ,  $I_к=I$ . В режиме С рабочую точку выбирают так, чтобы транзистор в режиме покоя находился в запертом состоянии, для чего создают ток базы в обратном направлении.

Для простоты будем рассматривать работу усилителя с входным сигналом синусоидальной формы. Полезная выходная мощность, которая получается в усилителе,

$$P_k = (1/2) U_{km} I_{km}, \quad (7.4)$$

где  $U_{km}, I_{km}$  — амплитуды напряжения и тока в цепи коллектора транзистора.

Энергия, потребляемая усилителем от источника постоянного напряжения, частично преобразуется в колебательную энергию, выделяемую в нагрузочном устройстве, а частично превращается в тепло, выделяемое в транзисторе. Мощность потребляемой энергии от источника постоянного тока при работе усилителя

$$P_0 = E_k I_0, \quad (7.5)$$

где  $I_0$  — постоянная составляющая тока транзистора.

Если известны режимы работы по постоянному и переменному токам, то можно определить к. п. д. транзистора:

$$\eta = P_k / P_0. \quad (7.6)$$

Используя формулы (7.4) и (7.5), получим

$$\eta = \frac{1}{2} \left( \frac{U_{km}}{E_k} \right) \cdot \left( \frac{I_{km}}{I_0} \right). \quad (7.6')$$

Естественно, к. п. д. усилителя в целом будет дополнительно снижаться из-за потерь энергии в иных элементах усилителя (обмотка трансформатора, резисторы в цепи эмиттера и базы).

Коэффициент полезного действия усилителя при работе в режиме А менее 50%, что является существенным недостатком этого режима. Но усилители, работающие в режиме А, имеют минимальные нелинейные искажения, что является большим достоинством таких усилителей.

Максимальный к. п. д. усилителя при работе в режиме В соответствует 78%. Недостатком работы усилителя в режиме В являются

ся большие нелинейные искажения (десятки процентов). Как правило, этот режим используется в двухтактных усилителях мощности, у которых транзисторы работают поочередно, в результате чего формируется выходное напряжение, имеющее практически синусоидальную форму.

Работа транзистора в режиме С используется в специальных усилителях и генераторных устройствах. К. п. д. такого усилителя может приближаться к единице, но нелинейные искажения в этом режиме очень велики.

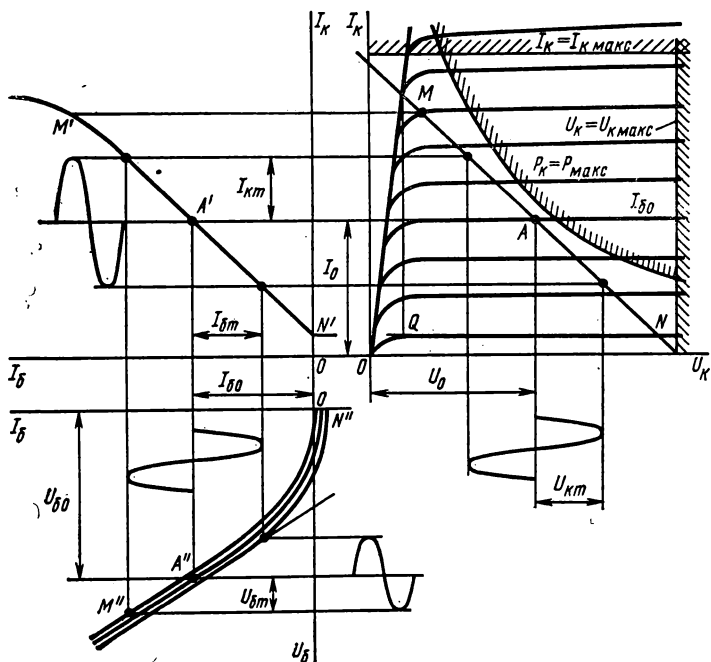


Рис. 7.2. Выбор рабочей точки в режиме А

Область допустимых рабочих режимов усилителя ограничена следующими основными предельными эксплуатационными величинами:

- 1) максимальная мощность транзистора  $P_{\max}$ ;
- 2) максимальное напряжение между коллектором и эмиттером транзистора  $U_{K.\max}$ ;
- 3) максимальный ток коллектора,  $I_{K.\max}$ .

Для обеспечения надежной работы транзистора условия работы должны быть такими, чтобы ток, напряжение и мощность не превышали предельно допустимых значений. Расчет усилителей мощности обычно проводится графоаналитически (рис. 7.2). На рисунке на семействе коллекторных характеристик показаны линии, соответствующие

щие предельным режимам. При этом линия, соответствующая  $UI = P_{\text{макс}}$ , — гипербола, а линии  $U = U_{\text{к.макс}}$  и  $I = I_{\text{к.макс}}$  — прямые, параллельные координатным осям. Границы допустимых рабочих режимов помечены на рис. 7.2 штриховкой.

Линия нагрузки должна полностью лежать в рабочей области и соответствовать максимально возможной мощности в нагрузочном устройстве (максимум площади  $\Delta MQN$ ) при минимуме искажений. С помощью линии нагрузки можно построить переходную характеристику  $I_{\text{к}}$  ( $I_{\text{б}}$ ), выбрать рабочую точку (например, точку А при работе в режиме А так, что  $MA = NA$ ), определить приведенное значение сопротивления нагрузки:

$$R'_H = U_{\text{км}} / I_{\text{км}} \quad (7.7)$$

и затем оценить возможность включения нагрузочного устройства непосредственно в цепь транзистора или в соответствии с формулой (7.2) рассчитать коэффициент трансформации выходного трансформатора.

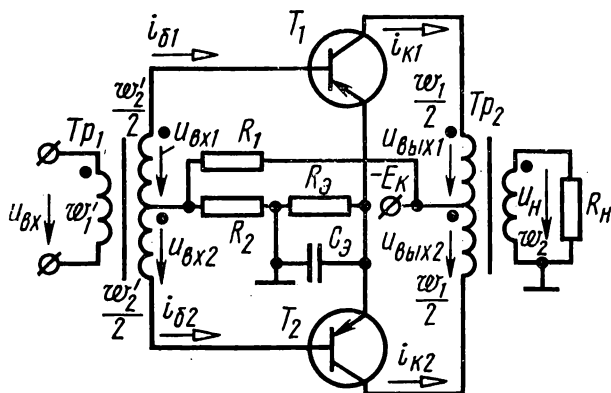


Рис. 7.3. Двухтактный усилитель мощности с трансформаторной связью

По входной характеристике  $I_{\text{б}}(U_{\text{б}})$  определяются режим работы цепи базы по постоянному току и допустимая величина входного напряжения.

Коэффициент усиления по току определяется по переходной характеристике:

$$K_I = I_{\text{км}} / I_{\text{бт}}. \quad (7.8)$$

Определив по входной характеристике транзистора  $U_{\text{бт}}$ , можно найти коэффициент усиления по мощности:

$$K_P = P_{\text{к}} / P_{\text{б}} = (U_{\text{км}} I_{\text{км}}) / (U_{\text{бт}} I_{\text{бт}}). \quad (7.9)$$

Наибольшее распространение получили *однотактный, двухтактный и бестрансформаторный усилители мощности*, питаемые от источника постоянного напряжения. Усилители, питаемые от источника

переменного напряжения, собирают по аналогичным схемам, но имеют некоторые особенности и поэтому будут рассмотрены отдельно.

*Однотактный усилитель* (см. рис. 7.1) обычно работает в режиме А и применяется в устройствах небольшой мощности. Трансформатор  $Tr$  согласует сопротивление  $R_H$  нагрузочного устройства с выходной цепью транзистора  $T$  для получения оптимального режима работы усилителя. Назначение остальных элементов аналогично назначению элементов в усилительном каскаде с общим эмиттером, рассмотренном в работе 3.

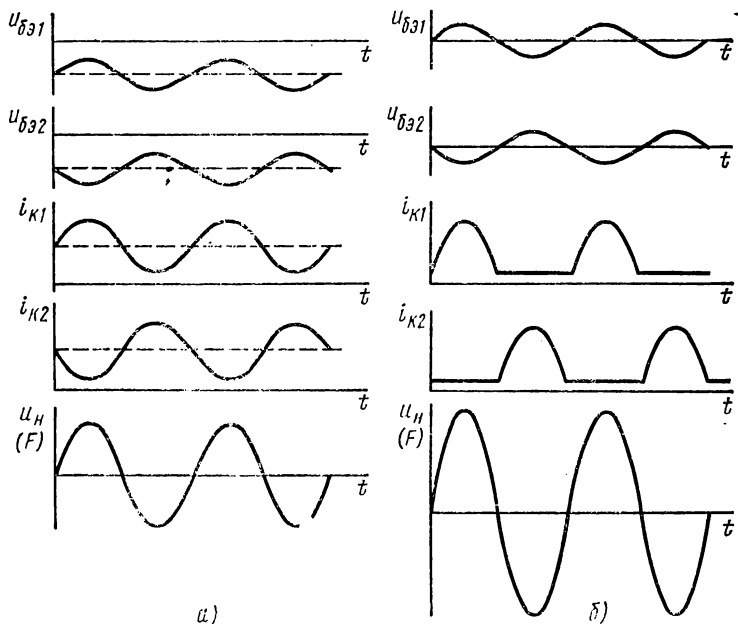


Рис. 7.4. Временные диаграммы токов и напряжений в цепях двухтактного усилителя мощности, работающего в режиме А (а) и режиме В (б)

*Двухтактный усилитель* (рис. 7.3) состоит из двух симметричных частей. Транзисторы  $T_1$  и  $T_2$  подбирают таким образом, чтобы их характеристики были максимально близкими друг к другу, причем транзисторы работают в одинаковом режиме. Единственным отличием в работе транзисторов является противофазность токов и напряжений в цепи базы транзисторов и в соответствии с этим противофазность переменных токов в коллекторной цепи.

Назначение элементов двухтактного усилителя аналогично назначению соответствующих элементов однотактного усилителя, а величины сопротивлений  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$  определяются с учетом того, что токи в них соответствуют токам двух транзисторов.

Входной трансформатор  $Tr_1$  обеспечивает получение одинаковых по величине, но противофазных по отношению к входным цепям усилителя напряжений  $u_{вх1}$  и  $u_{вх2}$ . Выходной трансформатор  $Tr_2$  суммирует переменные выходные токи и напряжения транзисторов. Работу двухтактного усилителя мощности иллюстрируют рис. 7.4, а (режим А) и рис. 7.4, б (режим В). Выходное напряжение  $u_n$  на нагрузочном резисторе  $R_n$  пропорционально магнитному потоку в магнитопроводе трансформатора  $Tr_2$ , определяемому намагничивающей силой  $F = \left( i_{к1} \frac{w_1}{2} - i_{к2} \frac{w_1}{2} \right)$ . Поэтому напряжение на нагрузочном резисторе  $R_n$  будет синусоидальным как при работе в режиме А, так и в режиме В, причем выходное напряжение и мощность при работе в режиме В будет в два раза больше, чем при работе в режиме А.

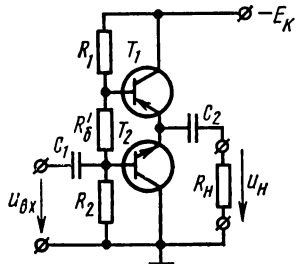


Рис. 7.5. Принципиальная схема бестрансформаторного усилителя мощности с дополнительной симметрией

К достоинствам двухтактных усилителей относятся меньшая масса и габариты выходного трансформатора по сравнению с одноктактным усилителем, так как в двухтактном усилителе отсутствует подмагничивание, меньшие нелинейные искажения и возможность получения большего к. п. д. при использовании режима В, меньшая чувствительность к пульсациям питающего напряжения. К недостаткам — усложнение схемы и конструкции усилителя (необходимо иметь два идентичных транзистора, два противофазных входных напряжения, выходной трансформатор должен иметь вывод средней точки).

Трансформатор — наиболее трудоемкий и крупногабаритный элемент в усилителе мощности, от которого желательно избавиться. Кроме того, трансформатор вносит дополнительные нелинейные искажения и снижает коэффициент полезного действия усилителя. Поэтому после создания надежных мощных транзисторов широкое распространение получили *бестрансформаторные усилители мощности*.

В полупроводниковых бестрансформаторных усилителях мощности транзисторы включаются по схеме с общим эмиттером, по схеме с общим коллектором или комбинируют эти включения.

Возможно использование бестрансформаторных усилителей с транзисторами различного типа ( $p-n-p$  и  $n-p-n$ ), имеющими дополнительную симметрию. В двухтактном бестрансформаторном усилителе с дополнительной симметрией (рис. 7.5) транзисторы  $T_1$  (типа  $p-n-p$ ) и  $T_2$  (типа  $n-p-n$ ) включены по схеме с общим коллектором, обеспечивающей минимальную величину выходного сопротивления, что особенно важно при работе на низкоомное нагрузочное устройство. Транзисторы должны быть подобраны с одинаковыми параметрами. Бестрансформаторный усилитель с дополнительной симметрией может работать как в режиме А, так и в режиме В. В бестрансформаторном усилителе резисторы  $R_1$ ,  $R_6$  и  $R_2$  обеспечивают

необходимый режим работы транзисторов  $T_1$  и  $T_2$ , а конденсаторы  $C_1$  и  $C_2$  являются разделительными.

На базы транзисторов воздействует одно и то же переменное напряжение  $u_{вх}$ . Однако в силу обратной структуры транзисторов ( $p-n-p$  и  $n-p-n$ ) токи в цепях транзисторов противофазны, а выходное напряжение, так же как в двухтактном усилителе мощности с трансформатором, определяется разностью токов транзисторов (см. рис. 7.4). Нагрузочный резистор  $R_H$  подключен к общей средней точке транзисторов, поэтому переменный ток в резисторе  $R_H$  и напряжение на нем в два раза больше тока и напряжения от одного транзистора.

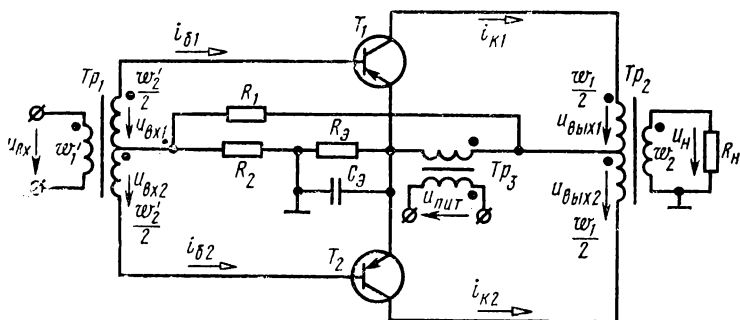


Рис. 7.6. Усилитель мощности с синфазным питанием транзисторов переменным напряжением

Основное достоинство транзисторного усилителя мощности с дополнительной симметрией — отсутствие входного и выходного трансформаторов, что особенно важно в портативной аппаратуре. Недостаток состоит в трудности подбора идентичных транзисторов разных типов.

Возможно создание усилителей мощности с питанием от источника переменного напряжения. Такое питание используется в тех случаях, когда стремятся упростить аппаратуру и не использовать выпрямительные устройства (в этом случае напряжение может подаваться непосредственно от сети переменного тока), а также в тех случаях, когда частота питающей сети совпадает с частотой входного напряжения, а выходное напряжение необходимо получить с учетом фазы входного напряжения, т. е. когда необходимо создать фазочувствительный усилитель.

Схемы усилителей, питаемых переменным напряжением, обычно выполняются двухтактными. Питание от источника переменного напряжения может быть синфазным и противофазным.

Синфазное питание транзисторов производится от трансформатора  $Tr_3$  (рис. 7.6). Входные напряжения  $u_{вх1}$  и  $u_{вх2}$  находятся в противофазе. Усилитель с синфазным питанием аналогичен по принципу действия двухтактному усилителю мощности с питанием от источника постоянного напряжения, но оба транзистора бывают в открытом состоянии только один полупериод, причем одновременно. Второй полупериод оба транзистора закрыты. В зависимости от

угла сдвига фазы входного напряжения относительно переменного напряжения питания ток коллекторной цепи, а следовательно, и выходное напряжение изменяют свою величину. Если угол сдвига равен  $90^\circ$ , выходное напряжение  $u_n$  равно нулю. Когда угол сдвига фаз меньше  $90^\circ$ , то фаза  $u_n$  совпадает с фазой  $u_{пит}$ , а если больше  $90^\circ$ , то  $u_n$  отличается на  $180^\circ$  от фазы  $u_{пит}$ .

Если в качестве нагрузочного устройства используется двигатель, направление вращения которого зависит от фазы управляющего напряжения, усилитель мощности с синфазным питанием дает возможность производить бесконтактное управление направлением и скоростью вращения двигателя.

Противофазное питание транзисторов производится через трансформатор  $Tr_2$  (рис. 7.7). Транзисторы при противофазном питании

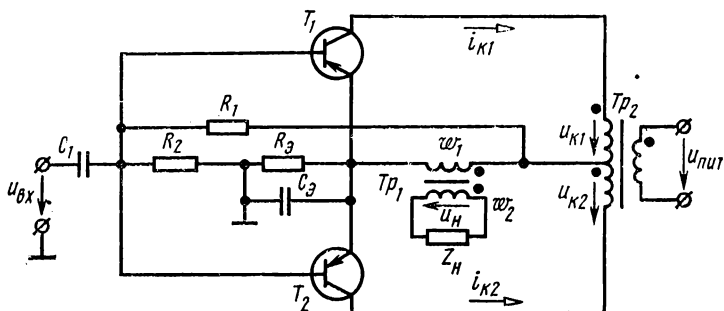


Рис. 7.7. Усилитель мощности с противофазным питанием транзисторов переменным напряжением

бывают в открытом состоянии поочередно по полпериода. Входное напряжение в усилителе с противофазным питанием подается одно и то же на оба транзистора. Нагрузочное устройство может включаться через трансформатор или непосредственно в общую цепь транзисторов, если мощность в нагрузочном устройстве при непосредственном включении оказывается достаточной и нагрузочное устройство допускает наличие постоянной составляющей тока.

Выходное напряжение усилителя мощности с противофазным питанием транзисторов переменным напряжением содержит гармоническую составляющую, частота которой равна частоте питающей сети, с изменяющейся амплитудой от  $U_{вх}$  и фазой, равной фазе входного напряжения. Поэтому усилитель мощности с противофазным питанием можно использовать для устройств с управлением по фазе входного напряжения.

## ОПИСАНИЕ ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ ПАНЕЛИ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

На испытательной панели (рис. 7.8) размещены два исследуемых усилителя: бестрансформаторный усилитель мощности и усилитель мощности с питанием переменным напряжением, а также вспомогательные устрой-

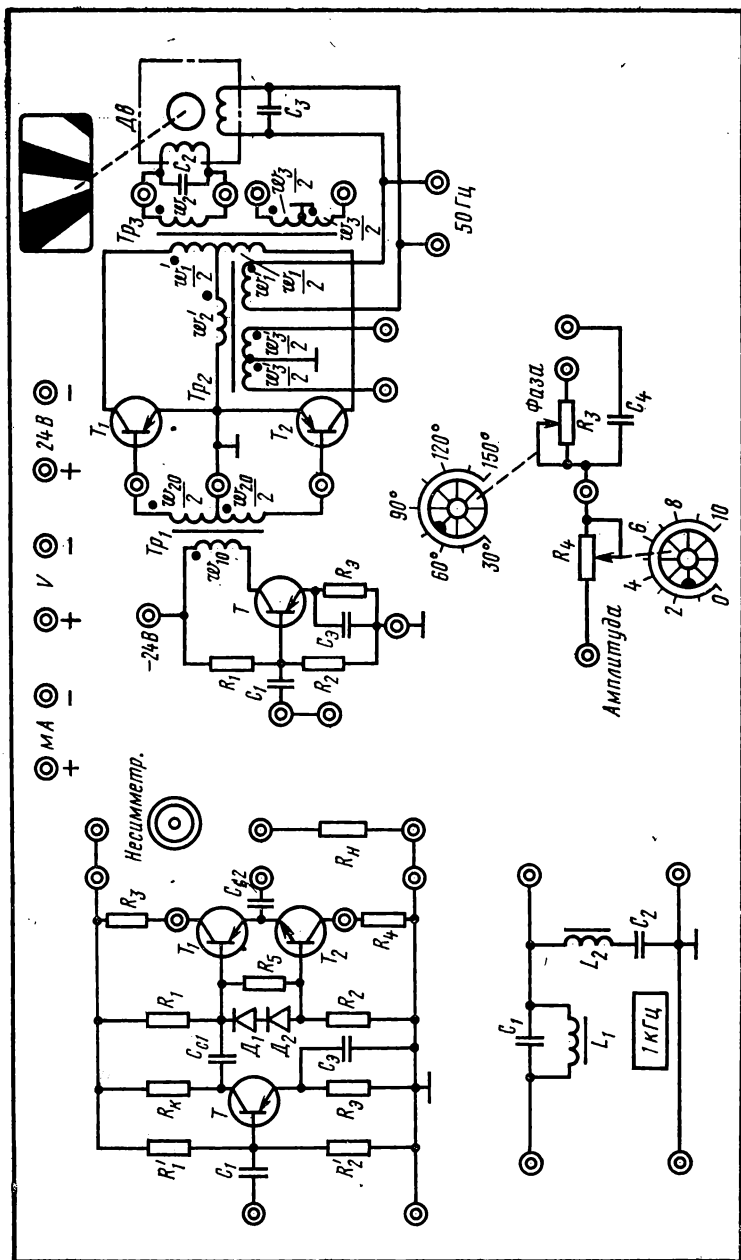


Рис. 7.8. Испытательная панель лабораторного стенда



ства — фильтр для измерения нелинейных искажений и фазовращатель для регулировки фазы усиливаемого напряжения.

Бестрансформаторный усилитель мощности собран по схеме с дополнительной симметрией на транзисторах П214 (типа  $p-n-p$ ) и КТ801Б (типа  $n-p-n$ ).

Транзисторы  $T_1$  и  $T_2$  включены по схеме с общим коллектором, что позволяет получить малое выходное сопротивление, но требует большого входного напряжения. Поэтому усиливаемое напряжение на усилитель мощности подается после предварительного усилителя на транзисторе  $T$  (П214Б), который включен по схеме с общим эмиттером. Усилитель мощности работает на нагрузочные резисторы с сопротивлением 20 Ом и более.

Транзисторы усилителя мощности работают в режиме В. Положение рабочей точки транзисторов  $T_1$  и  $T_2$  определяют резисторы  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_5$  и диоды  $D_1$  и  $D_2$ . Диоды  $D_1$  и  $D_2$  обеспечивают получение необходимого напряжения смещения эмиттерных переходов транзисторов  $T_1$  и  $T_2$ , а также осуществляют термостабилизацию выходных каскадов. Резистор  $R_5$  установлен для подгонки режима работы транзисторов и температурного коэффициента цепи температурной параметрической стабилизации. Связь предварительного каскада (коллекторная цепь транзистора  $T$ ) с оконечным каскадом (цепи баз транзисторов  $T_1$  и  $T_2$ ) производится через конденсатор связи. Назначение других элементов усилителя совпадает с типовым, описанным ранее.

Для определения коэффициента нелинейных искажений используется резонансный фильтр, расположенный в левом нижнем углу испытательной панели (рис. 7.8), настроенный на частоту первой гармоники (1 кГц). Фильтр содержит два настроенных контура: параллельный  $L_1C_1$  и последовательный  $L_2C_2$  — и пропускает на выход все гармонические составляющие напряжения, кроме первой (1 кГц). Это позволяет измерить действующее значение напряжения только высших гармоник. Напряжение, измеренное до фильтра, при небольших искажениях (до 10÷15%) практически равно напряжению первой гармоники.

Усилитель мощности с синфазным питанием транзисторов переменным напряжением, расположенный в правой части панели (рис. 7.8), работает на частоте 50 Гц. В качестве нагрузочного устройства служит обмотка двигате-

ля Дв типа РД-09. Ко второй обмотке двигателя подведено напряжение сети  $U_c = 127$  В. Противофазные напряжения в цепях баз транзисторов  $T_1$  и  $T_2$  обеспечивают одноконтный каскад предварительного усиления мощности, собранный на транзисторе  $T$ , с питанием его от источника постоянного напряжения. Все транзисторы ( $T$ ,  $T_1$  и  $T_2$ ) включены по схеме с общим эмиттером. В схеме усилителя использованы транзисторы  $p-n-p$ -типа П214.

В качестве устройства, имитирующего первичный измерительный преобразователь, который определяет амплитуду и фазу входного напряжения, применены фазовращатель  $R_3C_4$  мостового типа и переменный резистор  $R_4$ , регулирующий амплитуду. Устройство работает на частоте 50 Гц.

Если поменять местами трансформатор питания и выходной трансформатор, на базе данной панели можно получить усилитель с противофазным питанием переменным напряжением.

Помимо этого, если отключить вторичную обмотку трансформатора питания переменным напряжением и подать на среднюю точку постоянное напряжение, усилитель мощности превратится в двухтактный усилитель мощности с питанием постоянным напряжением.

Все трансформаторы смонтированы на радиаторах площадью около 70 см<sup>2</sup>, что необходимо для улучшения условий охлаждения транзисторов.

### ЗАДАНИЕ

#### А. Выполняется при подготовке к работе

1. Изучить особенности усилителей мощности.
2. Используя характеристики транзистора типа П214Б, выбрать положение рабочей точки для получения мощности 3 Вт при напряжении источника питания 24 В на нагрузочном резисторе с сопротивлением  $R_H = R'_H = 22$  Ом, если усилитель работает в режиме А и в режиме В.

#### Б. Выполняется в лаборатории

1. Включив соответствующие измерительные приборы, проверить рабочие режимы и симметрию бестрансформаторного усилителя мощности с дополнительной симметрией.

2. Снять амплитудную характеристику и зависимость выходной мощности в нагрузочном резисторе от входного напряжения усилителя на частоте 1 кГц.

3. Снять зависимость коэффициента нелинейных искажений от величины входного напряжения.

4. Построить зависимости, полученные в п. 2 и 3.

5. Проверить влияние несимметрии схемы на выходное напряжение и на нелинейные искажения. Зарисовать 3—4 характерных осциллограммы при работе в разных режимах.

6. Снять амплитудную характеристику усилителя с синфазным питанием переменным напряжением и зарисовать 4—5 характерных осциллограмм при различных фазовых сдвигах.

7. С помощью фазовращателя получить зависимость выходного напряжения от сдвига фаз между входным напряжением и напряжением питания.

#### **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ**

а) На испытательной панели смонтированы элементы усилителя мощности и сделаны основные соединения. При исследовании различных усилителей мощности надо сделать соответствующие соединения гибкими проводами и подключить необходимые нагрузочные и вспомогательные устройства. Исследования бестрансформаторного усилителя мощности осуществляются на частоте 1 кГц. Постоянная составляющая тока измеряется узкопрофильным миллиамперметром. Постоянные напряжения усилителя измеряются электронным вольтметром, а напряжение источника питания (24 В) контролируется цифровым вольтметром. Симметрия усилителя проверяется путем измерения постоянных составляющих токов и напряжений транзисторов. Отличие соответствующих величин не должно превышать нескольких процентов.

б) Амплитудная характеристика снимается путем подачи напряжения с генератора ГЗ-36 на вход усилителя. Определение величины входного напряжения осуществляется по шкале генератора, а измерение выходного напряжения усилителя производится электронным вольтметром типа В7-15.

Выходная мощность бестрансформаторного усилителя рассчитывается по формуле

$$P_{\text{н}} = U_{\text{н}}^2 / R_{\text{н}}, \quad (7.10)$$

где  $U_{\text{н}}$  — показание вольтметра (действующее значение);  $R_{\text{н}}$  — сопротивление нагрузочного резистора.

Следует избегать даже кратковременного закорачивания выходных зажимов усилителя мощности ( $R_{\text{н}}=0$ ), так как это приведет к выходу из строя транзисторов.

Зависимость выходной мощности от входного напряжения аналогична амплитудной характеристике усилителя, но на начальном участке близка к параболе. Амплитудная характеристика снимается непосредственно, а зависимость мощности от входного напряжения в данной работе получается расчетным путем.

в) Измерение коэффициента нелинейных искажений осуществляется с помощью электронного вольтметра. Сначала измеряется действующее значение выходного напряжения, практически совпадающее с действующим значением напряжения первой гармонической составляющей. Измерение действующего значения напряжения высших гармонических составляющих производится электронным вольтметром после фильтра, подавляющего напряжение основной частоты 1 кГц. Коэффициент нелинейных искажений определяется по формуле (7.3).

г) Амплитудная характеристика, зависимость мощности и зависимость коэффициента нелинейных искажений от входного напряжения для удобства анализа строятся на одном графике.

д) Несимметрия схемы вводится искусственно (кнопка «Несимметрия») и имитирует 10%-ное изменение параметров транзистора. Уровень изменения выходных величин следует сравнить с полученными ранее данными в номинальном режиме.

е) Осциллограммы следует снимать на входе усилителя (для проверки чистоты формы синусоидального напряжения генератора) и на выходе усилителя при нескольких значениях входного напряжения: при работе на линейном участке амплитудной характеристики, при наличии односторонних и двусторонних ограничений выходного напряжения. Все осциллограммы зарисовываются при одном значении коэффициента усиления усилителя осциллографа (ручка плавной регулировки), а из-

менение чувствительности производится путем ступенчатой регулировки в 10 или 100 раз.

ж) На лабораторном стенде могут быть собраны и исследованы усилители с синфазным и противофазным питанием переменным напряжением. Студенты исследуют один из усилителей по указанию преподавателя. Исследование усилителя с питанием переменным напряжением производится аналогично исследованию бестрансформаторного усилителя, но при частоте входного напряжения 50 Гц. Синхронизация развертки осциллографа должна производиться от сети. Параметры развертки не должны изменяться во время исследования усилителя.

з) Отсчет фазы производят по шкале фазовращателя. Особо надо отметить характерные значения фазы, соответствующие экстремальным и нулевым значениям выходного напряжения.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие особенности имеет усилитель мощности?
2. Какая схема включения транзистора дает наибольшее усиление мощности?
3. Перечислите ограничения, накладываемые на выбор положения рабочей точки. Дайте им обоснование.
4. Как определить к. п. д. усилителя по данным эксперимента?
5. Объясните назначение элементов однотактного и двухтактного усилителя.
6. Можно ли нагрузочное устройство включить непосредственно в коллекторную цепь транзистора?
7. Объясните, по каким причинам в усилителе мощности появляются нелинейные искажения.
8. Что произойдет, если один из транзисторов двухтактного усилителя выйдет из строя и будет удален?
9. Зависят ли нелинейные искажения от режима работы усилителя?
10. Сопоставьте усилители с синфазным и противофазным питанием.
11. Будет ли в нагрузочном устройстве, подключенном к усилителю мощности с питанием переменным напряжением, первая гармоническая составляющая напряжения при фазе входного напряжения относительно питающего напряжения  $45^\circ$ ?
12. Что такое амплитудная характеристика усилителя мощности?
13. Будет ли влиять изменение частоты входного напряжения на выходную мощность усилителя?
14. Изменится ли направление вращения двигателя, включенного в усилитель, питаемый переменным напряжением, если фаза входного напряжения изменится с  $45^\circ$  на  $135^\circ$ ?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 8

# ИССЛЕДОВАНИЕ НЕУПРАВЛЯЕМЫХ И УПРАВЛЯЕМЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

**Цель работы:** изучение принципа действия и основных характеристик неуправляемых и управляемых выпрямителей. Ознакомление с принципом действия и основными характеристиками компенсационного стабилизатора постоянного напряжения.

### КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Для питания электронных устройств требуется постоянное напряжение различной величины. Однако наиболее распространенным источником электрической энергии является промышленная сеть переменного напряжения частотой 50 Гц. Для преобразования переменного напряжения в постоянное применяют *выпрямительные устройства*. В выпрямительное устройство обычно входит трансформатор, один или несколько вентилях, сглаживающий фильтр, электронный стабилизатор постоянного напряжения. На рис. 8.1 представлена структурная схема выпрямительного устройства. Переменное напряжение сети  $u_c$  с помощью трансформатора  $Tr$  преобразуется до величины, определяемой требованиями того или иного нагрузочного устройства с эквивалентным сопротивлением  $R_H$ , питание которого обеспечивает выпрямитель. Вентиль  $B$  (или несколько соединенных по определенной схеме вентилях) — прибор с односторонней проводимостью — обеспечивает в нагрузочном устройстве ток одного направления. Сглаживающий фильтр  $\Phi$  уменьшает пульсации выпрямленного напряжения до необходимой величины. Стабилизатор напряжения  $Ст$  поддерживает постоянным напряжение на нагрузочном устройстве при изменении его сопротивления или напряжения сети.

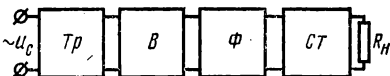


Рис. 8.1. Структурная схема выпрямительного устройства

В зависимости от условий работы отдельные элементы выпрямительного устройства могут отсутствовать. Как правило, это касается электронного стабилизатора, а иногда и сглаживающего фильтра. Существует *однополупериодное* и *двухполупериодное выпрямление* переменного однофазного напряжения. В настоящей работе используются *однополупериодный* и *мостовой двухполупериодный* выпрямители. Схема однополупериодного выпрямителя приведена на рис. 8.2, а. В этом выпрямителе вентиль включен последовательно с нагрузочным резистором  $R_H$  и вторичной обмоткой трансформатора  $Tr$ . Первичная обмотка трансформатора питается от сети.

Из временных диаграмм (рис. 8.2, б) видно, что ток  $i_H$  в нагрузочном устройстве имеет пульсирующий характер. В течение первого полупериода напряжения  $u_2$ , когда потенциал точки  $a$  положительный по отношению к потенциалу точки  $b$ , вентиль открыт и в нагруз-

зочном резисторе появляется ток. Если считать, что сопротивление вентиля в открытом состоянии равно нулю, то все напряжение будет приложено к нагрузочному резистору. Во второй полупериод полярность напряжения на вторичной обмотке трансформатора изменяется на противоположную, т. е. потенциал точки  $a$  становится отрицательным по отношению к потенциалу точки  $b$ . При такой полярности вентиль включен в обратном направлении. Если считать, что сопротивление закрытого вентиля равно бесконечности, то все напряжение вторичной обмотки трансформатора будет приложено к закрытому вентилю и его максимальное значение  $U_{\text{обр. макс}} = \sqrt{2} U_2$ .

Широкое применение нашли *двухполупериодные* выпрямители, в которых в отличие от однополупериодных выпрямителей используются оба полупериода напряжения сети. Из них наибольшее рас-

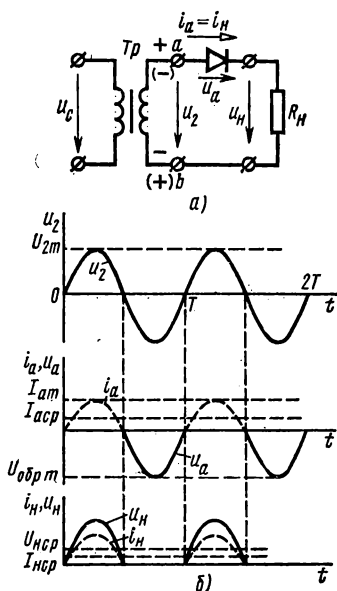


Рис. 8.2. Схема (а) и временные диаграммы токов и напряжений (б) однополупериодного выпрямителя

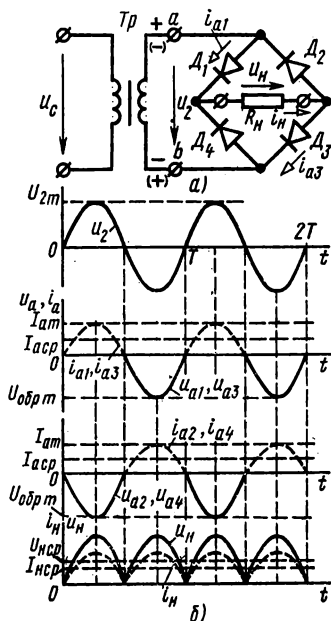


Рис. 8.3. Схема (а) и временные диаграммы токов и напряжений (б) мостового двухполупериодного выпрямителя

пространение получил мостовой двухполупериодный выпрямитель (рис. 8.3, а), в состав которого входят трансформатор  $Tr$ , четыре диода (вентили)  $D_1$ — $D_4$ , включенные по мостовой схеме, и нагрузочный резистор  $R_H$ .

В один из полупериодов напряжения сети, когда зажим  $a$  вторичной обмотки трансформатора имеет положительный потенциал по отношению к зажиму  $b$ , диоды  $D_1$  и  $D_3$  открыты, а диоды  $D_2$  и  $D_4$  закрыты (рис. 8.3, б). Ток в этот полупериод имеет направление:

зажим  $a$  вторичной обмотки трансформатора, диод  $D_1$ , нагрузочный резистор  $R_n$ , диод  $D_3$  и зажим  $b$ .

В другой полупериод зажим  $a$  имеет отрицательный потенциал по отношению к зажиму  $b$ . В этот полупериод диоды  $D_1$  и  $D_3$  закрыты, а диоды  $D_2$  и  $D_4$  открыты, ток имеет направление от зажима  $b$  через диод  $D_4$ , нагрузочный резистор  $R_n$ , диод  $D_2$  к зажиму  $a$  вторичной обмотки трансформатора. При этом в течение всего периода ток в нагрузочном резисторе  $R_n$  имеет одно и то же направление.

Основными показателями работы выпрямителей являются: среднее значение напряжения на нагрузочном устройстве (резисторе)  $U_{н.ср}$ ;

среднее значение тока в нагрузочном устройстве  $I_{н.ср}$ ;

максимальное обратное напряжение  $U_{обр.макс}$ ;

максимальное значение выпрямленного напряжения  $U_{н.макс}$  и коэффициент пульсаций;

условия эксплуатации (диапазон температуры, влажности вибрации и т. д.);

к. п. д. выпрямителя;

габариты и масса выпрямителя.

Условия работы выпрямительных устройств и предъявляемые к ним требования определяют выбор вентиля. В настоящее время в выпрямительных устройствах применяются в основном полупроводниковые диоды, реже — электронные электровакуумные диоды.

**Выбор диодов** для выпрямительных устройств производят так, чтобы их основные параметры соответствовали основным показателям работы выпрямительного устройства. Основные параметры диодов подразделяются на *электрические параметры* и *предельные эксплуатационные параметры*. К электрическим параметрам относятся:

средний ток при прямом включении диода  $I_{пр.ср}$ ;

среднее падение напряжения на диоде при прямом включении  $U_{пр.ср}$  (эти два параметра определяют коэффициент полезного действия выпрямителя; чем меньше  $U_{пр.ср}$  при заданном  $I_{пр.ср}$ , тем выше к. п. д.);

средний обратный ток диода  $I_{обр.ср}$ .

Предельными эксплуатационными параметрами, характеризующими предельный электрический режим использования диода, являются:

максимальное обратное напряжение  $U_{обр.макс}$ ;

максимальное значение прямого тока  $I_{пр.макс}$  (или  $I_{выпр.макс}$ ).

Кроме указанных параметров часто необходимо знать диапазон рабочих температур окружающей среды, относительную влажность, постоянные и ударные ускорения, вибрационные ускорения в определенном диапазоне частот.

Полупроводниковые диоды имеют высокое значение  $I_{пр.ср}$  при относительно небольших значениях  $U_{пр.ср}$ , что определяет высокий к. п. д. выпрямителя. Срок службы полупроводниковых диодов очень высок. Высокие эксплуатационные параметры полупроводниковых диодов сочетаются с весьма малыми габаритами и массой при хорошей механической прочности. К их недостаткам следует отнести невысокое предельное значение плюсовых температур (у германиевых диодов оно составляет  $+70^\circ\text{C}$ , а у кремниевых может достигать до  $+125^\circ\text{C}$ ); относительно невысокие значения  $U_{обр.макс}$  (несколько сотен вольт).

Электронные электровакуумные диоды не имеют недостатков полупроводниковых приборов: у них очень высокий верхний предел



по температуре и они имеют очень высокие значения  $U_{обр.макс}$  (до нескольких десятков киловольт), но зато у них низкие значения  $I_{пр.ср}$  при высоком  $U_{пр.ср}$ . С учетом энергии, расходуемой на подогрев катода, коэффициент полезного действия выпрямителей на электронных электровакуумных диодах невысокий. Кроме того, наличие подогреваемого катода значительно сокращает срок службы этих диодов.

Если сравнить мостовой выпрямитель с однополупериодным, то при одном и том же напряжении вторичной обмотки трансформатора и сопротивлении нагрузочного устройства  $R_n$  средний выпрямленный ток  $I_{н.ср}$  и напряжение  $U_{н.ср}$  в мостовом выпрямителе в два раза больше, чем в однополупериодном, а максимальное обратное напряжение на каждом из диодов в мостовом выпрямителе будет то же, что и в однополупериодном выпрямителе. Помимо уже названных достоинств мостового выпрямителя следует также отметить, что габариты и масса трансформатора, используемого в мостовом выпрямителе, меньше, чем у однополупериодного выпрямителя, вследствие отсутствия подмагничивания сердечника трансформатора постоянным магнитным потоком, как это имеет место в однополупериодном выпрямителе. Недостатком мостового выпрямителя является необходимость применения четырех диодов.

Если сравнивать параметры полупроводниковых и электронных электровакуумных диодов с основными показателями рассматриваемых выпрямителей, то выявляется определенная целесообразность в использовании того или иного типа вентиля в этих выпрямителях. Так, полупроводниковые диоды из-за малых габаритов и небольшой массы, а также малых значений  $U_{пр.ср}$  и невысоких значений  $U_{обр.макс}$  следует применять в мостовом выпрямителе. Электронные электровакуумные диоды, способные выдерживать большие обратные напряжения, обычно применяют в высоковольтных источниках напряжения.

В однополупериодном выпрямителе можно включать каждый из рассмотренных вентилях.

**Сглаживающие фильтры.** Выпрямленное напряжение на нагрузочном устройстве имеет пульсирующий характер. Для питания большинства электронных устройств напряжение с такими пульсациями не может быть использовано, поэтому пульсации стремятся уменьшить до заданного уровня. Устройства, с помощью которых достигается снижение пульсаций, называют *сглаживающими фильтрами*.

В качестве элементов сглаживающих фильтров применяют индуктивные катушки и конденсаторы, сопротивление которых зависит от частоты. У индуктивных катушек сопротивление постоянному току мало, а индуктивное сопротивление переменному току увеличивается с ростом частоты. У конденсаторов сопротивление постоянному току равно бесконечности, а емкостное сопротивление переменному току уменьшается с ростом частоты. Таким образом, для переменной составляющей тока индуктивное сопротивление катушки значительно больше сопротивления постоянной составляющей. Поэтому при включении индуктивной катушки (индуктивный фильтр) последовательно с нагрузочным устройством падение напряжения на нагрузочном устройстве от переменной составляющей тока снижается, т. е. пульсации выпрямленного напряжения уменьшаются.

При подключении конденсатора (емкостный фильтр) параллельно нагрузочному устройству сопротивление фильтра для переменной

составляющий тока значительно меньше, чем для постоянной составляющей. Поэтому и в этом случае пульсации выпрямленного напряжения на нагрузочном устройстве значительно уменьшаются. Эффективность работы любого сглаживающего фильтра определяют два показателя:

коэффициент пульсации  $p$ , равный отношению амплитудного значения основной гармоники выпрямленного напряжения  $U_{н1m}$  к постоянной составляющей, равной среднему выпрямленному напряжению,

$$p = U_{н1m}/U_{н.ср}; \quad (8.1)$$

коэффициент сглаживания  $q$ , равный отношению коэффициентов пульсаций на входе и выходе фильтра, т. е.

$$q = p_{вх}/p_{вых}. \quad (8.2)$$

В выпрямительных устройствах находят применение различные сглаживающие фильтры. Простыми фильтрами являются *индуктивные и емкостные фильтры*. Более сложными являются *Г-образные и П-образные сглаживающие фильтры*, в которых в различных комбинациях включены основные составные элементы — индуктивные катушки и конденсаторы. В данной работе исследуются два типа сглаживающих фильтров: емкостной фильтр и Г-образный RC-фильтр.

Емкостной фильтр реализуетс-я конденсатором  $C_\phi$ , включенным параллельно нагрузочному резистору  $R_H$ . На рис. 8.4 приведены схема однополупериодного выпрямителя с емкостным фильтром и поясняющие работу фильтра временные диаграммы.

Рассмотрим работу фильтра в установившемся режиме, т. е. спустя некоторое время после включения напряжения. Ток  $i_a$  в диоде  $D$  появляется тогда, когда напряжение на вторичной обмотке трансформатора  $U_2$  больше напряжения на конденсаторе, что соответствует интервалам времени  $t_1 - t_2$  и  $t_3 - t_4$  (рис. 8.4, б). В это время конденсатор  $C_\phi$  заряжается до амплитудного значения напряжения вторичной обмотки  $U_{2m}$ . С момента времени  $t_2$  напряжение  $u_2$  становится меньше напряжения на конденсаторе  $u_c$ , диод  $D$  запирается, а конденсатор начинает разряжаться на нагрузочный резистор  $R_H$ . Скорость разряда конденсатора определяется постоянной времени  $\tau_{раз} =$

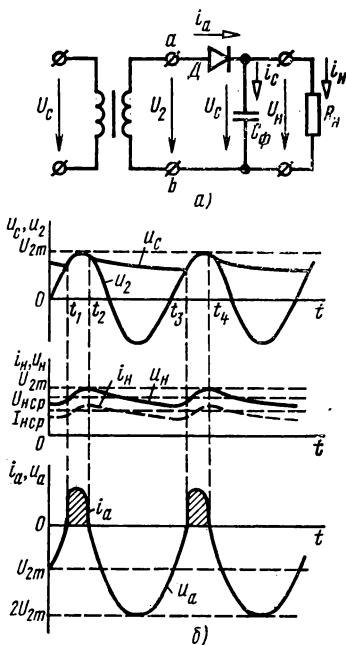


Рис. 8.4. Схема (а) и временные диаграммы токов и напряжений (б) однополупериодного выпрямителя с емкостным фильтром

$= R_H C_\Phi$ . К запортому вентилю в это время прикладывается напряжение  $u_a$ , максимальное значение которого почти равно удвоенному значению  $U_{обр. макс} U_{2m}$  (рис. 8.4, б).

К моменту времени  $t_3$  напряжение  $U_2$  вновь становится больше напряжения  $U_C$ , диод  $D$  открывается и вновь ток  $i_a$  начинает заряжать конденсатор  $C_\Phi$  и т. д. Таким образом, ток нагрузочного устройства  $i_H$ , который без фильтра отсутствовал в отрицательные полупериоды напряжения  $U_2$ , теперь имеется за счет разряда конденсатора  $C_\Phi$ . Это приводит к увеличению среднего значения выпрямленного напряжения и к уменьшению его переменной составляющей.

Емкость конденсатора  $C_\Phi$  выбирают такой, чтобы выполнялось соотношение

$$C_\Phi \gg 1/(2\pi f_{осн} R_H). \quad (8.3)$$

Если требуется получить более высокий коэффициент сглаживания, то прибегают к сложным сглаживающим фильтрам.

К ним относятся Г-образные фильтры LC- и RC-типа.

Подключение индуктивной катушки  $L_\Phi$  к емкостному фильтру  $C_\Phi$  (рис. 8.5, а) приводит к тому, что за счет падения напряжения на индуктивной катушке  $L_\Phi$  значительно уменьшается доля перемен-

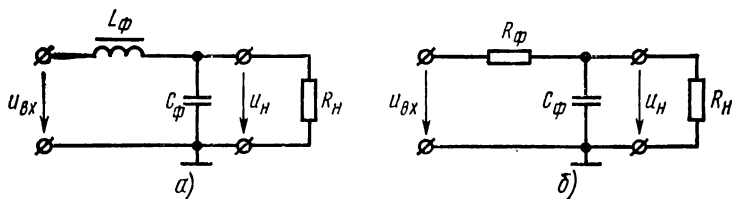


Рис. 8.5. Схемы Г-образных фильтров LC-типа (а), RC-типа (б)

ной составляющей выпрямленного напряжения. Падения напряжения от постоянной составляющей тока практически нет, так как активное сопротивление индуктивной катушки стараются сделать очень малым.

В маломощных выпрямительных устройствах, когда надо значительно уменьшить вес, габариты и стоимость фильтра, вместо индуктивной катушки обычно включают резистор  $R_\Phi$  (рис. 8.5, б).

«Фильтрующее» действие резистора  $R_\Phi$  заключается в том, что при  $x_{C_\Phi} \ll R_H$  на  $R_\Phi$  происходит большее падение переменной составляющей выпрямленного напряжения, чем постоянной. Обычно величины  $R_H$  и  $R_\Phi$  соизмеримы, и тогда коэффициент сглаживания фильтра определяется по формуле

$$q = \frac{P_{вх}}{P_{вых}} = \frac{U_{вх1m} / U_{0вх}}{U_{вых1m} / U_H} = \frac{\sqrt{R_\Phi^2 + x_{C_\Phi}^2}}{x_{C_\Phi}} \cdot \frac{R_H}{R_H + R_\Phi}. \quad (8.4)$$

Чтобы уменьшение постоянной составляющей выпрямленного напряжения было не очень большим, обычно величину  $R_\Phi$  выбирают такой:

$$R_H / (R_H + R_\Phi) = 0,5 \div 0,9. \quad (8.5)$$

Если Г-образные фильтры не позволяют уменьшить пульсации до необходимого уровня, то применяют многозвенные фильтры. Общий коэффициент сглаживания многозвенного фильтра равен произведению коэффициентов сглаживания фильтров, из которых он состоит.

При работе выпрямительного устройства часть выпрямленного напряжения падает на активном сопротивлении вторичной обмотки трансформатора и на прямом сопротивлении открытого диода. Следовательно, с ростом величины выпрямленного тока  $I_{н.ср}$  увеличивается падение напряжения на этих сопротивлениях и напряжение на нагрузочном устройстве  $U_n$  уменьшается. Зависимость  $U_n = f(I_n)$  называется *внешней характеристикой*. Эта характеристика является одной из важнейших характеристик выпрямительного устройства. Сопротивление открытого диода зависит от величины тока, поэтому и зависимость  $U_n = f(I_n)$  нелинейна (рис. 8.6, кривая 1). Если в выпрямительное устройство включен фильтр, то зависимость  $U_n = f(I_n)$  изменится. Емкостному фильтру соответствует кривая 2, а Г-образному RC-фильтру — кривая 3.

В режиме холостого хода ( $I_n = 0$ ) при включении как емкостного, так и Г-образного RC-фильтров выпрямленное напряжение  $U_n$  больше напряжения в случае, когда эти фильтры отсутствуют. Это обусловлено тем, что конденсатор  $C_\Phi$  заряжается до амплитудного значения выпрямленного напряжения  $U_m$ . С увеличением тока  $I_n$ , что связано с уменьшением сопротивления  $R_n$ , уменьшение величины выпрямленного напряжения  $U_n$  в схеме с емкостным фильтром происходит более резко, чем без него. Это происходит из-за того, что на величину выпрямленного напряжения влияет более быстрый разряд конденсатора при уменьшении  $R_n$ . Величина выпрямленного напряжения при холостом ходе выпрямителя с Г-образным фильтром такая же, как и у выпрямителя с емкостным фильтром, однако наклон внешней характеристики выпрямителя с Г-образным фильтром больше за счет падения напряжения на резисторе  $R_\Phi$ .

Из-за изменений напряжения сети и изменений сопротивления нагрузочного устройства выпрямленное напряжение на нем может меняться.

Для ряда потребителей изменения напряжения у обычных выпрямителей могут оказаться недопустимыми, в связи с чем возникает необходимость их стабилизации. Стабилизация осуществляется с помощью дополнительного устройства, называемого *стабилизатором*, которое включают между фильтром и нагрузочным устройством.

Стабилизаторы постоянного напряжения бывают параметрическими и компенсационными. Наиболее простым является *параметрический стабилизатор*, называемый так потому, что его работа основана на использовании определенных зависимостей параметров полупроводниковых и газоразрядных стабилитронов.

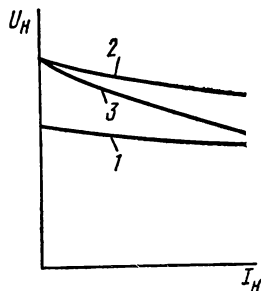


Рис. 8.6. Внешние характеристики выпрямителей

Качество работы стабилизаторов напряжения характеризуется коэффициентом стабилизации

$$k_{\text{ст}} = \frac{\Delta U_{\text{вх}} / U_{\text{вх.ср}}}{\Delta U_{\text{н}} / U_{\text{н.ср}}} = \frac{\Delta U_{\text{вх}} U_{\text{н.ср}}}{\Delta U_{\text{н}} U_{\text{вх.ср}}} \quad (8.6)$$

Коэффициент стабилизации параметрического стабилизатора с полупроводниковым стабилитроном может достигать 100, а с газоразрядным стабилитроном не превышает 10.

Еще более высокий коэффициент стабилизации (несколько сотен или тысяч единиц) можно получить, применив *компенсационные стабилизаторы*.

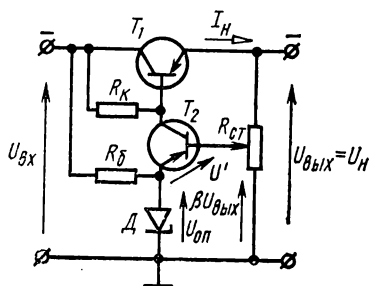


Рис. 8.7. Схема компенсационного полупроводникового стабилизатора

Различают стабилизаторы *параллельного* и *последовательного* типов. Как наиболее экономичный, чаще применяется компенсационный стабилизатор последовательного типа, который исследуется в данной лабораторной работе. Нестабилизированное напряжение после фильтра поступает на вход рассматриваемого стабилизатора (рис. 8.7), а с выхода стабилизатора снимается стабилизированное напряжение, подаваемое на нагрузочное устройство. Выходное напряжение определяется как разность входного напряжения и падения напряжения  $\Delta U$  на транзисторе  $T_1$ , т. е.  $U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} - \Delta U$ . Часть выходного напряжения, снимаемая с потенциометра  $R_{\text{ст}}$ , сравнивается с опорным напряжением  $U_{\text{оп}}$ , создаваемым параметрическим стабилизатором на стабилитроне  $D$ . Их разность  $U' = \beta U_{\text{вых}} - U_{\text{оп}}$  подается между базой и эмиттером маломощного усилителя на транзисторе  $T_2$ , называемом *управляющим*. Напряжение  $U'$  вызывает изменение коллекторного тока в транзисторе  $T_2$ , что приводит за счет падения напряжения на резисторе  $R_K$  к изменению потенциала базы мощного транзистора  $T_1$ , называемого *регулирующим*. Спротивление участка коллектор — эмиттер, а следовательно, и падение напряжения на транзисторе  $T_1$ , равное  $\Delta U$ , изменяются, что приводит к компенсации изменений выходного напряжения и обеспечивает его величину практически неизменной.

Компенсационный стабилизатор позволяет поддерживать напряжение на нагрузочном устройстве постоянным при изменениях входного напряжения стабилизатора и тока в нагрузочном устройстве.

Работу компенсационного стабилизатора можно проиллюстрировать на примере случая, когда изменяется ток в нагрузочном устройстве.

Пусть ток нагрузочного устройства возрастает. Тогда выходное напряжение стабилизатора за счет увеличения падения напряжения  $\Delta U$  на транзисторе  $T_1$  от этого тока должно уменьшиться, т. е.  $U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} - \Delta U$ . Но выходное напряжение остается постоянным. Уменьшение  $U_{\text{вых}}$  приводит к уменьшению  $\beta U_{\text{вых}}$ , а следовательно, и к уменьшению напряжения  $U'$ . Это вызывает уменьшение коллекторного тока транзистора  $T_2$  и падение напряжения на резисторе

$R_k$ . Тогда потенциал базы транзистора увеличивается, сопротивление участка коллектор — эмиттер транзистора  $T_1$  и падение напряжения на нем  $\Delta U$  уменьшаются. Причем снижение  $\Delta U$  таково, что практически полностью компенсирует первоначальное увеличение  $\Delta U$ , вызванное ростом тока нагрузочного устройства.

Для увеличения коэффициента стабилизации стабилизатора вместо однокаскадного усилителя, собранного на транзисторе  $T_2$ , применяют однокаскадные УПТ, выполненные на базе интегральных операционных усилителей. Коэффициент стабилизации при этом может составить величину в несколько тысяч.

Одной из основных характеристик компенсационного стабилизатора является зависимость выходного напряжения нагруженного стабилизатора от его входного напряжения при неизменной величине нагрузочного резистора  $R_n$ . Эта характеристика приведена на рис. 8.8. Рабочим участком характеристики является горизонтальный участок  $ab$ , т. е. в диапазоне  $U_{вх.мин} \div U_{вх.макс}$  стабилизатор стабилизирует входное напряжение. За пределами участка  $ab$  нормальный режим работы приборов, входящих в стабилизатор (в первую очередь — стабилитрона), нарушается и схема перестает стабилизировать. Угол наклона горизонтального участка к оси абсцисс определяет величину коэффициента стабилизации стабилизатора.

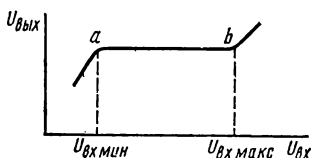


Рис. 8.8. Выходная характеристика компенсационного стабилизатора

Довольно часто в различного рода устройствах требуется регулировать величину выпрямленного напряжения. Такие выпрямители получили название *управляемых выпрямителей*. В них в качестве управляемых вентилях в настоящее время применяются тиристоры. **Тиристор** — полупроводниковый переключатель — изготавливается из кремния и имеет три  $p$ - $n$ -перехода (рис. 8.9, а). Напряжение питания  $E_a$  подается на тиристор так, что переходы  $P_1$  и  $P_3$  открыты, а переход  $P_2$  закрыт. Ток  $I_a$ , проходящий через тиристор, при этом будет определяться высоким сопротивлением закрытого перехода. На рис. 8.9, б приведены вольт-амперные характеристики тиристора для положительных значений напряжений. С увеличением напряжения  $U_a$  ток тиристора возрастает незначительно. Но при достижении напряжения  $U_{вкл}$  (рис. 8.9, б) наступает электрический пробой в переходе  $P_2$ . При этом происходит лавинообразное увеличение числа носителей зарядов за счет лавинного умножения носителей в переходе  $P_2$  движущимися дырками и электронами. В результате этого ток  $I_a$  увеличивается скачком и напряжение на тиристоре уменьшается.

В анодную цепь тиристора для ограничения тока включают резистор  $R_a$ . При скачкообразном росте анодного тока увеличивается падение напряжения на резисторе  $R_a$  и напряжение на тиристоре уменьшается. Изменение анодного тока после наступления электрического пробоя производится изменением величин  $R_a$  или  $E_a$ . Если снять питающее напряжение, то свойства  $p$ - $n$ -перехода  $P_2$  восстанавливаются.

Напряжение  $U_{вкл}$  можно снизить введением дополнительных носителей в любой из слоев, образующих переход  $P_2$ . Появление

дополнительных носителей увеличивает число актов ионизации атомов в переходе, и поэтому напряжение  $U_{вкл}$  уменьшается. Дополнительные носители зарядов, образующие ток  $I_y$ , вводятся в тиристор вспомогательной цепью от источника питания  $E_y$ . Влияние величины тока  $I_y$  на работу тиристора видно из рис. 8.9, б.

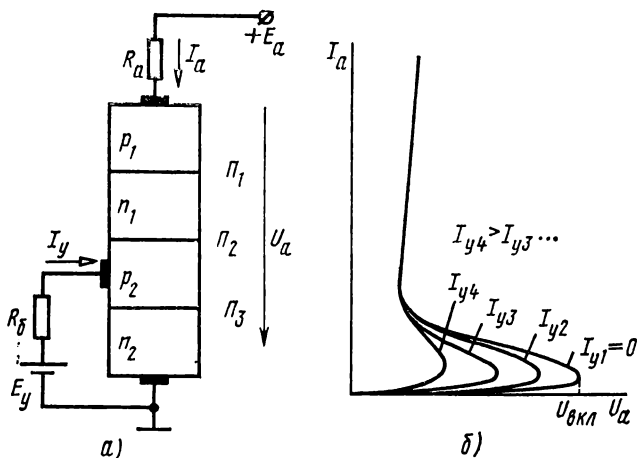


Рис. 8.9. Структурная схема (а) и вольт-амперные характеристики (б) тиристора

При включении тиристора в обратном направлении переходы  $\Pi_1$  и  $\Pi_3$  будут закрыты и в нем появится весьма небольшой ток. Во избежание пробоя тиристора в обратном направлении необходимо, чтобы обратное напряжение было меньше  $U_{обр.доп}$ .

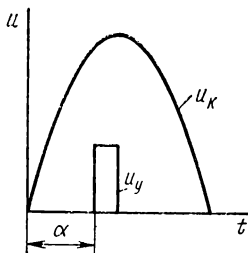


Рис. 8.10. Фазовое управление моментом отпирания тиристора

Управление в выпрямителе сводится к управлению моментом отпирания тиристорov. Наиболее распространенный способ управления тиристорами — *импульсно-фазовый*; при этом на управляющий электрод тиристора периодически подаются импульсы напряжения  $u_y$ , которые могут сдвигаться во времени по отношению к моменту появления положительной полуволны коллекторного напряжения тиристора  $u_k$  (рис. 8.10). В результате меняется момент отпирания тиристора, начиная с которого и до конца положительной полуволны коллекторного напряжения, тиристор находится в открытом состоянии. Этот сдвиг обозначается  $\alpha$  и называется

*углом управления*.

В том случае, когда  $\alpha=0$ , ток в нагрузочном резисторе  $I_{н.ср}$  будет максимальным (рис. 8.11, а). При увеличении  $\alpha$  ток  $I_{н.ср}$  будет уменьшаться. На рис. 8.11, б изображена осциллограмма тока при  $\alpha=90^\circ$ . При  $\alpha=180^\circ$  ток нагрузки становится равным нулю.

К управляющим импульсам напряжения предъявляются следующие требования:

крутизна управляющих импульсов должна быть весьма высокой, чтобы четко открывались тиристоры;

амплитуда и длительность управляющих импульсов должны быть достаточными для надежного открывания, но амплитуда не должна превышать допустимых значений  $I_{удоп}$ .

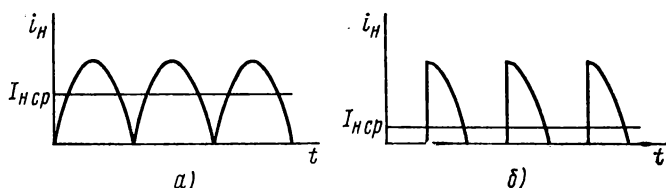


Рис. 8.11. Осциллограммы тока в нагрузочном устройстве при фазовом управлении при  $\alpha=0$  (а) и при  $\alpha=90^\circ$  (б)

Исходя из этих требований и проектируется устройство (блок) импульсного фазового управления. На рис. 8.12, а изображена схема управляемого двухполупериодного выпрямителя с выводом средней точки вторичной обмотки трансформатора с импульсно-фазовым управлением.

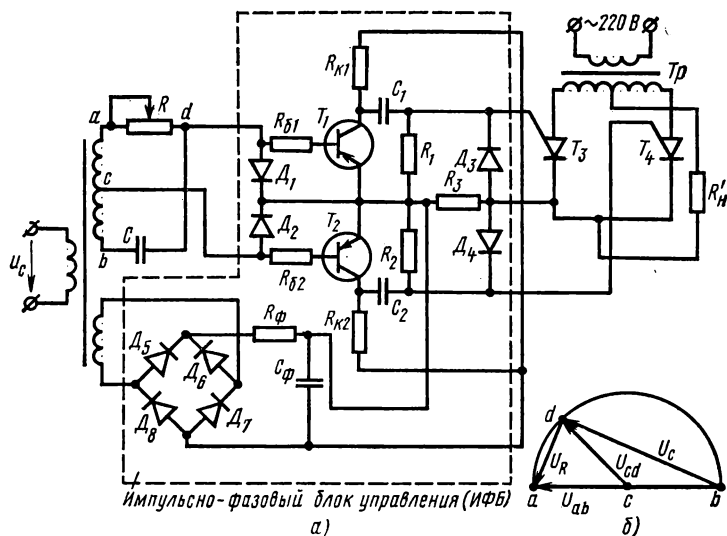


Рис. 8.12. Схема двухполупериодного выпрямителя с импульсно-фазовым управлением (а); векторная диаграмма мостового фазовращателя (б)



Напряжение в цепь управления подается через мостовой фазовращатель, состоящий из трансформатора с выводом средней точки вторичной обмотки, конденсатора  $C$  и переменного резистора  $R$ . При изменении величины сопротивления  $R$ , как видно из круговой векторной диаграммы (рис. 8.12, б), угол сдвига фазы выходного напряжения моста по отношению к входному может изменяться от 0 до  $180^\circ$ . При этом величина выходного напряжения моста остается неизменной.

Управляющее напряжение после фазовращателя через диоды  $D_1$  и  $D_2$ , которые пропускают только положительные полуволны синусоидального напряжения, поступает на два транзистора  $T_1$  и  $T_2$ . Питательное коллекторное напряжение подается на транзисторы с отдельного выпрямителя, собранного по мостовой схеме (диоды  $D_5$ ,  $D_6$ ,  $D_7$  и  $D_8$ ). Выходные напряжения, снимаемые с транзисторов, имеют трапецеидальную форму, так как на их входы подаются напряжения довольно значительной величины, выходящие далеко за пределы линейного участка переходной характеристики транзистора. Далее трапецеидальные напряжения дифференцируются с помощью цепочек  $R_1C_1$  и  $R_2C_2$ . На управляющие электроды тиристоров  $T_3$  и  $T_4$  поступают довольно положительные импульсы напряжения, так как отрицательные импульсы шунтируются диодами  $D_3$  и  $D_4$ .

Таким образом, изменяя величину сопротивления переменного резистора  $R$ , можно изменять время прихода управляющих импульсов на управляющие электроды тиристоров.

## ОПИСАНИЕ ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ ПАНЕЛИ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Исследуемые устройства размещены на испытательной панели, общий вид которой изображен на рис. 8.13.

Вольт-амперная характеристика тиристора снимается с помощью характериографа, ручки управления которого расположены в правой нижней части испытательной панели: ручка «Рег.  $I_y$ » плавно изменяет величину тока управления  $I_y$  тиристора; переключатель  $\Pi$  подключает тиристор к характериографу и отключает его.

Осциллограф подключается к характериографу с помощью проводника и кабеля, которые соединяют одноименные гнезда и разъемы « $\rightarrow$ )X» и « $\rightarrow$ )1M $\Omega$ 50pF» испытательной панели и осциллографа. Схема подключения исследуемого тиристора к характериографу изображена на рис. П.15.

Все элементы неуправляемых (однополупериодного и мостового) и управляемого выпрямителей, сглаживающих фильтров и компенсационного стабилизатора установлены на испытательной панели. Для проведения исследований эти функциональные блоки при необходимости соединяются проводниками между собой. Так же

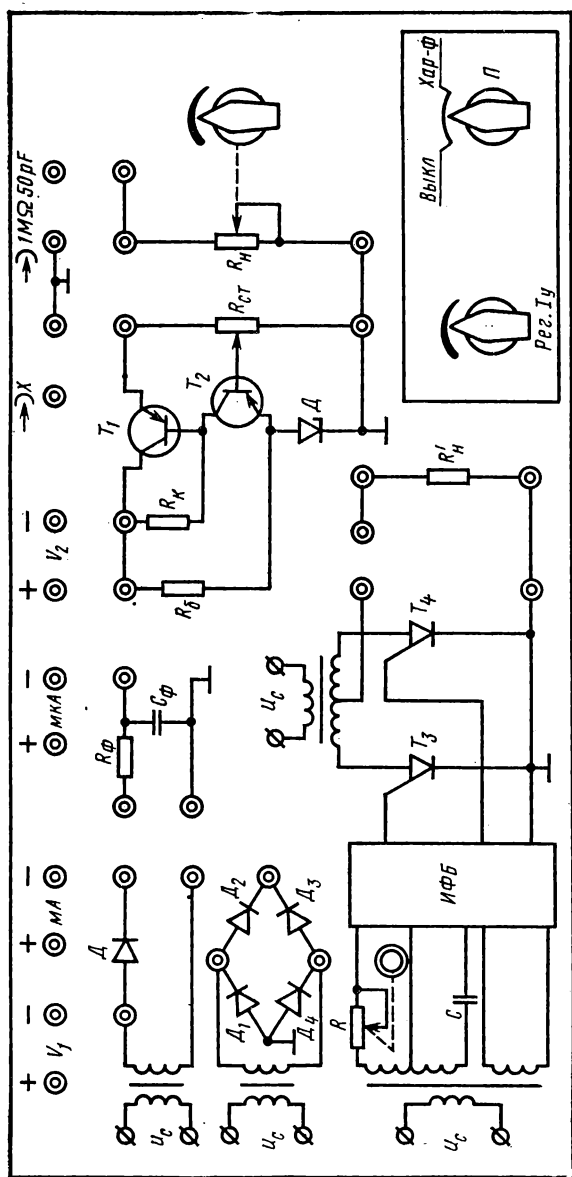


Рис. 8.13. Испытательная панель лабораторного стенда

подсоединяются к исследуемым схемам измерительные приборы, гнезда которых установлены в верхней части испытательной панели.

В неуправляемых выпрямителях применяются полупроводниковые диоды разных типов, основные электрические параметры которых приведены в табл. 8.1.

Таблица 8.1

Тип прибора	Полупроводниковый материал	$U_{пр.ср'}$ В не более	$I_{пр.ср'}$ мА	$I_{обр.ср'}$ мкА	$U_{обр.макс'}$ В
Д226В	Кремний	1	300	100	300
Д226Б	"	1	300	100	400
Д202	"	1	100	500	100
Д217	"	1	100	50	800

В управляемом выпрямителе установлены тиристоры типа КУ-101Б ( $I_{пр.доп}=75$  мА,  $U_{обр.макс}=50$  В,  $P_{к.макс}=150$  мВт,  $I_{у.пр}=15$  мА). На испытательной панели схема импульсно-фазового управления изображена не в полном объеме. На панели изображены элементы мостового фазовращателя: конденсатор и переменный резистор, с помощью которого меняется фаза выходного напряжения моста по отношению к его входному напряжению, а следовательно, регулируется и время прихода импульсов на управляющие электроды тиристоров. Остальная часть схемы, в которую входят диоды  $D_1$  и  $D_2$ , транзисторы  $T_1$  и  $T_2$ , а также диоды  $D_3—D_8$  вместе с дифференцирующими цепочками  $R_1C_1$  и  $R_2C_2$ , изображена в виде четырехполюсника ИФБ.

В компенсационном стабилизаторе постоянного напряжения использованы транзистор  $T_1$  типа П-214, транзистор  $T_2$  — МП-42 и стабилитрон типа Д813. Величина обратной связи  $\beta$  регулируется переменным резистором  $R_{ст}$ , ручка которого находится на внутренней стороне испытательной панели.

## ЗАДАНИЕ

А. Выполняется при подготовке к работе

1. Нарисовать две схемы неуправляемого выпрямителя (однополупериодного и мостового) и схему управляемого выпрямителя с импульсно-фазовым управлением.

На этих схемах изобразить включение измерительных приборов для измерений  $U_2$ ,  $U_{н.ср}$  и  $I_{н.ср}$ .

2. Рассчитать напряжение на нагрузке  $U_{н.ср}$  для схем однополупериодного и мостового управляемых выпрямителей (без фильтра). Значение  $U_2$  взять из табл. 8.2 в соответствии с номером своей бригады.

3. Рассчитать значение среднего выпрямленного тока  $I_{н.ср}$  и максимальное обратное напряжение на диоде  $U_{обр.макс}$  для однополупериодного и мостового выпрямителей без фильтра и сравнить расчетные значения с паспортными данными соответствующих диодов.

4. Произвести расчет коэффициентов пульсации и сглаживания для RC-фильтра. Значение  $U_2$ , а также емкость конденсатора  $C_\phi$  и величины  $R_\phi$ ,  $R_H$  указаны в табл. 8.2.

Т а б л и ц а 8.2

Номер бригады	Тип диода	$U_2$ , В	$C_\phi$ , мкФ	$R_\phi$ , Ом	$R_H$ , Ом
1	Д226В	15	300	100	200
2	Д202	30	200	120	460
3	Д226В	15	250	80	310
4	Д226Б	30	100	100	560
5	Д226В	15	300	100	200
6	Д202	30	100	120	600
7	Д226Б	15	200	80	310
8	Д226Б	30	100	100	560
9	Д226В	30	150	100	500
10	Д217	15	300	120	200
11	Д226Б	30	200	80	250
12	Д226Б	30	300	100	150
13	Д217	30	150	100	600
14	Д226В	15	100	120	400
15	Д226Б	30	200	80	700

## Б. Выполняется в лаборатории

1. Исследование однополупериодного выпрямителя: зарисовать осциллограммы для рассчитанного значения тока  $I_{н.ср}$ , измерить  $U_{н.ср}$  и сравнить с расчетными значениями; снять внешнюю характеристику.

2. Исследование двухполупериодного мостового выпрямителя:

а) зарисовать осциллограмму напряжения на нагрузке для рассчитанного значения тока  $I_{н.ср}$ , измерить  $U_{н.ср}$  и сравнить его с расчетным значением;

б) снять внешнюю характеристику.

### 3. Исследование выпрямителя с фильтром:

а) зарисовать осциллограммы напряжения на нагрузочном резисторе при включении в однополупериодный выпрямитель фильтров типа  $C$  и  $RC$  (при расчетном  $I_{н.ср}$ ), измерить  $U_{н.ср}$ ; б) снять внешние характеристики выпрямителя с  $C$ - и  $RC$ -фильтрами;

в) зарисовать осциллограммы напряжения на нагрузочном резисторе при включении в мостовой выпрямитель фильтров типа  $C$  и  $RC$  (при расчетном  $I_{н.ср}$ ), измерить  $U_{н.ср}$ ;

г) снять внешние характеристики выпрямителя с  $C$ - и  $RC$ -фильтрами;

д) по результатам измерений подсчитать коэффициенты пульсаций и сглаживания для  $RC$ -фильтра и сравнить их с расчетными.

4. Исследование компенсационного стабилизатора: снять внешнюю характеристику  $U_H = f(I_H)$  при изменении  $I_H$  и  $U_2 = \text{const}$  и определить границы стабилизации.

5. Исследование управляемого выпрямителя на тиристорах:

а) с помощью характериографа снять вольт-амперную характеристику тиристора;

б) снять регулировочную характеристику  $U_H = f(\alpha)$  и зарисовать осциллограммы для  $\alpha = 0^\circ$ ,  $\alpha = 90^\circ$  и измерить для этих  $\alpha$  нагрузочный ток.

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

а) В лабораторной работе питающее напряжение подается через трансформатор от сети 50 Гц и включается тумблером, установленным в правой части стенда на панели управления (см. приложение). Величина напряжения постоянна.

б) Переменное и постоянное напряжения измеряются цифровым или универсальным вольтметром. Изменение тока  $I_{н.ср}$  производится с помощью переменного резистора  $R_H$ . Выпрямленные токи фиксируются многопредельным узкопрофильным миллиамперметром. В соответствии с измеренными токами и напряжениями переключатели диапазонов измерительных приборов следует поставить на необходимые пределы.

в) Осциллографирование исследуемых кривых тока проводится с помощью осциллографа С1-68. Исследуемый сигнал с помощью специального кабеля подается на гнездо «→) 1MΩ50pF» осциллографа. Ручка осциллографа «Усиление» устанавливается в таком положении, чтобы изображения кривых тока располагались по центру экрана ЭЛТ и занимали две трети экрана. При дальнейшей работе положение этой ручки не должно изменяться. В работе необходимо снять вольт-амперную характеристику с помощью характериографа.

г) При снятии вольт-амперной характеристики тиристора его подключение к характериографу осуществляется с помощью переключателя  $\Pi$ , который устанавливается в положение «Характериограф». Изменение тока  $I_y$  тиристора производится с помощью ручки «Рег.  $I_y$ ». При работе с управляемым выпрямителем переключатель  $\Pi$  следует установить в положение «Выкл.».

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Нарисуйте осциллограммы напряжения на нагрузочном резисторе  $U_H$  при одно- и двухполупериодном выпрямлении.

2. Какие приборы необходимо включить для снятия внешней характеристики выпрямительного устройства?

3. Прибором какой системы измеряют постоянную составляющую тока (или напряжения)?

4. В каком из выпрямителей постоянная составляющая тока в нагрузочном резисторе  $I_H$  наименьшая?

5. В каком из трех выпрямителей максимальное обратное напряжение  $U_{обр. макс}$  на вентиле наибольшее?

6. В каком из выпрямителей постоянная составляющая напряжения  $U_H$  на нагрузочном резисторе наименьшая?

7. Укажите преимущества полупроводникового диода перед электронным электровакуумным диодом.

8. Какие параметры диодов ограничивают величину мощности, которую необходимо получить на нагрузке?

9. Как изменится напряжение на нагрузочном резисторе выпрямителя без фильтра, если параллельно  $R_H$  подключить конденсатор достаточно большой емкости?

10. Как изменится величина пульсации напряжения в нагрузочном устройстве  $R_H$ , если увеличить емкость фильтра  $C_\Phi$ ?

11. Как изменится максимальное обратное напряжение, приложенное к запертому диоду, при подключении конденсатора параллельно нагрузке?

12. Как изменится величина постоянного напряжения на нагрузочном устройстве  $R_H$ , если увеличить сопротивление резистора  $R_\Phi$  RC-фильтра?

13. Каким должно быть оптимальное соотношение емкостного сопротивления  $C$ -фильтра и сопротивления в нагрузочном устройстве  $R_H$ ?

14. Укажите преимущества и недостатки  $RC$ -фильтра по сравнению с  $LC$ -фильтром.

15. Как изменится величина коэффициента сглаживания двухзвенного фильтра при последовательном соединении двух фильтров, (коэффициент сглаживания каждого из них  $q_1$  и  $q_2$ )?

16. Как изменится коэффициент стабилизации  $k_{ст}$  компенсационного стабилизатора, если уменьшить коэффициент усиления усилителя, собранного на транзисторе  $T_1$ ?

17. Как изменится напряжение на выходе стабилизатора, если опорное напряжение в компенсационном стабилизаторе уменьшилось?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 9

### ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОГЕНЕРАТОРОВ СИНУСОИДАЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ

**Цель работы:** изучение работы некоторых типов автогенераторов синусоидальных колебаний.

#### КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

*Автогенератор* — устройство для создания электрических колебаний определенной величины, частоты и формы за счет энергии источников постоянного или переменного электрического тока.

В зависимости от устройства и назначения автогенератора частота колебаний может лежать в пределах от долей герца до  $10^{11} \div 10^{12}$  Гц. По форме генерируемых колебаний генераторы разделяют на *генераторы гармонических* (синусоидальных) и *релаксационных* (несинусоидальных) колебаний.

Функциональная схема генератора изображена на рис. 9.1. Незатухающие колебания в генераторе поддерживаются за счет энергии источника питания *ИП*. Усилитель с коэффициентом усиления  $\tilde{K} = K e^{j\alpha}$  регулирует поступление энергии из источника питания. Через цепь положительной обратной связи с коэффициентом передачи  $\tilde{\beta} = \beta e^{j\psi}$  напряжение определенной величины и фазы, необходимое для поддержания незатухающих колебаний, поступает с выхода усилителя на его вход.

Вследствие нелинейности характеристик усилительного элемента величина коэффициента усиления при увеличении входного напряжения начинает уменьшаться, если амплитуда входного напряжения превысит некоторую величину. Если предположить, что напряжение  $\tilde{U}_{вх}$  подается от внешнего источника и цепь обратной связи не соединена со входом усилителя (разомкнута), то на выходе усилителя появляется напряжение  $\tilde{K}\tilde{U}_{вх}$ , а на выходе цепи обратной связи — напряжение  $\tilde{K}\tilde{\beta}\tilde{U}_{вх}$ . Если

$$\tilde{K}\tilde{\beta} = 1, \quad (9.1)$$

т. е.

$$K\beta = 1 \text{ (условие баланса амплитуд),} \quad (9.2a)$$

$$\varphi + \psi = 2\pi n, \quad n = 0, 1, 2, \dots \text{ (условие баланса фаз),} \quad (9.2b)$$

то напряжение на выходе цепи обратной связи будет одинаково по величине и совпадать по фазе с напряжением внешнего источника  $U_{вх}$ . Если замкнуть цепь обратной связи, то такое устройство начнет работать как автогенератор. Поэтому выражение (9.1) является *условием существования незатухающих колебаний автогенератора*. Если  $\beta$  меньше  $1/K$ , то напряжение на выходе цепи обратной связи будет слишком мало, напряжение на выходе генератора будет уменьшаться и колебания исчезнут. Если  $\beta > 1/K$ , напряжение на выходе будет увеличиваться до тех пор, пока нелинейность характеристики усилителя не приведет к уменьшению  $K$  до величины, при которой выполняется условие (9.2а).

Если условие (9.2б) выполняется на одной частоте, то автогенератор является генератором гармонических колебаний, если на нескольких, то в генераторе возникнут несинусоидальные колебания.

В зависимости от усилительного элемента, используемого в генераторе (электронная лампа или транзистор), различают *ламповые* и *полупроводниковые автогенераторы*. В зависимости от того, какие пассивные элементы (индуктивные катушки и конденсаторы или резисторы и конденсаторы) использованы в автогенераторе, различают *автогенераторы LC- и RC-типов*. В большинстве автогенераторов используются транзисторы. Более стабильные по частоте автогенераторы *LC-типа* используются для получения синусоидального напряжения частотой от единиц килогерц до десятков мегагерц. Для частот менее 1 кГц автогенератор *LC-типа* создать трудно, так как добротность индуктивных катушек на этих частотах мала. Поэтому для получения синусоидальных колебаний частотой от единиц герц до десятков килогерц используют автогенераторы *RC-типа*. Они имеют меньшую, чем автогенераторы *LC-типа*, стабильность частоты, но являются более простыми и более дешевыми.

Процесс самовозбуждения колебаний в транзисторном генераторе рассмотрим на примере генератора с трансформаторной обратной связью (рис. 9.2). Каскад резонансного усилителя (схема с общим эмиттером) с контуром  $L_K C_K$  охвачен положительной обратной связью, напряжение обратной связи подается на базу транзистора через катушку связи  $L_6$ , индуктивно связанную с катушкой  $L_K$ . Резисторы  $R_1, R_2, R_3$  обеспечивают нормальный режим транзистора по постоянному току, конденсаторы  $C_1, C_2$  уменьшают падение напряжения от переменных составляющих токов на резисторах  $R_2$  и  $R_3$ .

При включении источника питания  $E_K$  в коллекторной цепи рассматриваемого генератора появится ток  $i_K$  (рис. 9.3, а), а также токи  $i_L$  (рис. 9.3, б),  $i_C$  в элементах контура. Ток  $i_L$  катушки контура  $L_K$  создает в катушке  $L_6$  напряжение. Напряжение  $u_6$  вызывает появление в базовой цепи тока  $i_6$ . Катушка  $L_6$  включена так, что ток  $i_6$ , усиленный транзистором ( $i_K \approx h_{21} i_6$ , где  $h_{21}$  — коэффициент усиления по току транзистора  $T$ ), способствует возрастанию тока  $i_K$ , что еще больше увеличивает  $i_L, u_6$  и т. д. (положительная обратная связь). При этом больше всего усиливается составляющая коллекторного тока с частотой  $\omega_0 = 1/\sqrt{L_K C_K}$ , на которой коэффи-

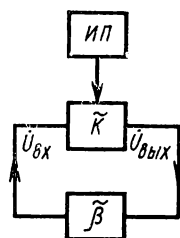


Рис. 9.1. Функциональная схема генератора



циент усиления усилительного каскада максимален. Это нарастание будет происходить до тех пор, пока не начнет выполняться условие (9.1). При этом в генераторе устанавливается режим стационарных колебаний, амплитуда и частота которых остаются постоянными.

На рис. 9.3 графически показан описанный процесс установления колебаний. Амплитуда колебаний в установившемся режиме (рис. 9.3, в) определяется величиной э. д. с. источника питания  $E_K$ , коэффициентом обратной связи  $\tilde{\beta}$ , параметрами транзистора ( $h_{11}$ ,  $h_{21}$ ,  $h_{22}$ ) и контура ( $L_6$ ,  $L_K$ ,  $C_K$ ,  $r_K$ ). Регулировка амплитуды колебаний

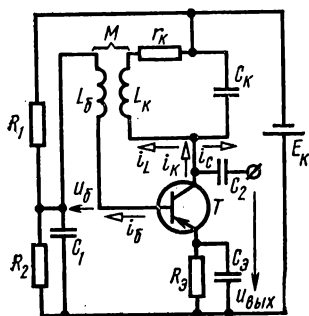


Рис. 9.2. Принципиальная схема автогенератора с трансформаторной обратной связью

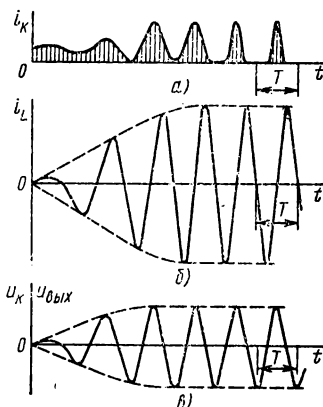


Рис. 9.3. Графики, поясняющие процесс установления колебаний коллекторного тока транзистора (а); переменной составляющей тока в катушке индуктивности контура (б) и выходного напряжения (в)

автогенератора производится изменением величины напряжения источника  $E_K$  или параметров транзистора. Частота колебаний в схеме определяется по формуле

$$\omega_0 \approx 1/\sqrt{L_K C_K}. \quad (9.3)$$

Регулировка частоты осуществляется изменением параметров контура ( $L_K$  или  $C_K$ ).

Коэффициент обратной связи  $\tilde{\beta}$  можно рассчитать как отношение входного напряжения усилителя  $U_6$  к напряжению на выходе  $U_{\text{вых}} = U_K$ :

$$\tilde{\beta} = \frac{U_6}{U_K} = \frac{j\omega_0 M \dot{I}_L}{(r_K + j\omega_0 L_K) \dot{I}_L}, \quad (9.4)$$

где  $M$  — взаимная индуктивность катушек  $L_K$  и  $L_6$ . Так как для индуктивных катушек, употребляемых в автогенераторах  $LC$ -типа,

выполняется условие  $\omega_0 L \gg r_k$ , то

$$\tilde{\beta} \approx M/L_k. \quad (9.5)$$

Таким образом, для данного автогенератора коэффициент обратной связи  $\tilde{\beta}$  есть действительное число.

Рассмотрим *RC-генератор синусоидальных колебаний с мостом Вина*. Схема моста Вина изображена на рис. 9.4. Если считать, что к входным зажимам *ac* моста Вина приложено напряжение  $\dot{U}_{ac}$  частоты  $\omega = 2\pi f$ , то для напряжения  $\dot{U}_{bc}$  на выходных зажимах моста можно записать:

$$\dot{U}_{bc} = \dot{U}_{ac} \frac{\omega CR}{3\omega CR - j(1 - \omega^2 C^2 R^2)}. \quad (9.6)$$

Соотношение для коэффициента передачи  $\tilde{\beta}$  моста Вина будет на основании формулы (9.6) иметь вид  $\tilde{\beta} = \dot{U}_{bc}/\dot{U}_{ac} = \beta e^{j\psi}$ , где

$$\beta = \frac{\omega CR}{\sqrt{(3\omega CR)^2 + (1 - \omega^2 C^2 R^2)^2}}, \quad (9.7)$$

$$\operatorname{tg} \psi = (1 - \omega^2 C^2 R^2)/(3\omega CR). \quad (9.8)$$

На рис. 9.5 приведена зависимость модуля коэффициента передачи  $\beta$  и фазового сдвига  $\psi$  от частоты. На некоторой частоте  $f_0$  [ $f_0 = 1/(2\pi CR)$ ], называемой *частотой квазирезонанса*, коэффициент передачи  $\beta$  имеет максимальное значение

$$\beta_0 = 1/3, \quad (9.9)$$

а сдвиг фаз  $\psi$  между входным и выходным напряжением равен нулю.

Для самовозбуждения усилителя с мостом Вина в цепи обрат-

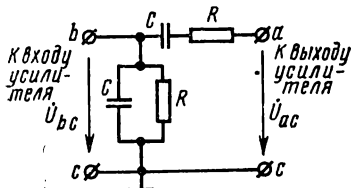


Рис. 9.4. Схема моста Вина

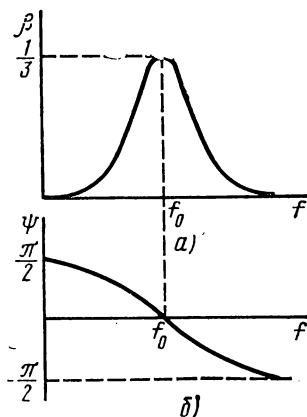


Рис. 9.5. Зависимость модуля коэффициента передачи  $\beta$  (а) и фазового сдвига  $\psi$  (б) моста Вина от частоты

ной связи необходимо, чтобы усилитель обладал достаточным коэффициентом усиления для компенсации потерь напряжения в цепи обратной связи и, кроме того, сдвиг фаз между выходным и входным напряжением усилителя должен быть равен нулю. Этим условиям

удовлетворяет усилитель с четным числом каскадов. Частота генерируемых синусоидальных колебаний автогенератора с мостом Вина определяется как

$$f_0 = 1/(2\pi CR). \quad (9.10)$$

На рис. 9.6 представлена схема автогенератора с мостом Вина. Двухкаскадный усилитель на транзисторах  $T_2$  и  $T_3$  охвачен цепью положительной обратной связи с мостом Вина, вход которого (ас) соединен с выходом усилителя.

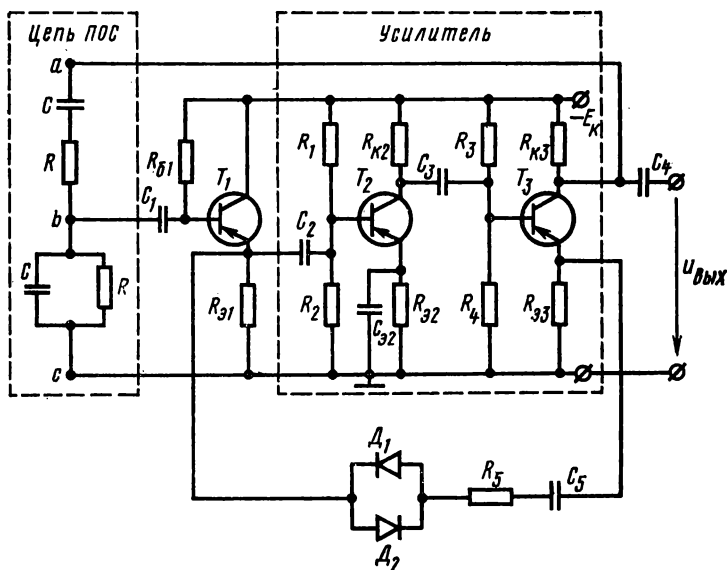


Рис. 9.6. Схема автогенератора с мостом Вина

присоединен к выходу усилителя. Напряжение с моста Вина (зажимов *bc*) поступает на первый каскад усилителя. Чтобы не нарушать симметрию моста Вина (равенство активных сопротивлений резисторов и емкостей конденсаторов в последовательной и параллельной цепочках), необходимо обеспечить высокое входное сопротивление первого каскада усилителя, что достигается использованием эмиттерного повторителя на транзисторе  $T_1$ . Фазовый сдвиг, вносимый эмиттерным повторителем, равен нулю, и общий фазовый сдвиг входного и выходного напряжений усилителя равняется  $2\pi$ , как этого требует условие баланса фаз. Как видно из рис. 9.5,  $a$ , ослабление, вносимое мостом Вина на частоте  $f_0$ , равно  $1/3$  ( $\beta_0 = 1/3$ ), следовательно, для нормальной работы автогенератора коэффициент усиления усилителя  $K$  должен превышать  $1/\beta_0 = 3$ .

Для улучшения формы выходного напряжения в генераторе применена цепь нелинейной отрицательной обратной связи, стабили-

зирующая амплитуду выходного напряжения и обеспечивающая работу всех транзисторов в линейном режиме. Эта цепь состоит из конденсатора  $C_5$ , резистора  $R_5$  и параллельно включенных диодов  $D_1$  и  $D_2$ .

Особенность этой цепи состоит в том, что коэффициент передачи цепи обратной связи возрастает с увеличением амплитуды колебаний (при этом уменьшается сопротивление диодов и возрастает напряжение на выходе цепи). Таким образом, при включении источника питания амплитуда колебаний растет; растущая отрицательная обратная связь уменьшает коэффициент усиления и происходит стабилизация амплитуды колебаний на заданном уровне. Этот уровень определяется величиной сопротивления резистора  $R_5$ . Конденсатор  $C_5$  служит для устранения связи входной и выходной цепей по постоянному току.

## ОПИСАНИЕ ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ ПАНЕЛИ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Схема испытательной панели данной лабораторной работы приведена на рис. 9.7. В верхней части панели находятся клеммы для подключения вольтметров и амперметров.

На транзисторе  $T$  смонтирована схема, которая может быть использована как резонансный усилитель с контуром  $L_K C_K$  в коллекторной цепи либо как автогенератор  $LC$ -типа с трансформаторной связью. Обратная связь в автогенераторе обеспечивается катушкой  $L_6$ , имеющей несколько выводов, обеспечивающих различные значения коэффициента обратной связи  $\beta$ , отсчитываемого между каждым из этих выводов и выводом  $I$ .

Исследование автогенераторов  $RC$ -типа производится с помощью усилителя, собранного на транзисторах  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ , и цепи положительной обратной связи (мост Вина, состоящий из конденсаторов  $C$  и резисторов  $R$ ). В усилителе предусмотрена регулировка коэффициента усиления, для чего в цепь коллектора транзистора  $T_2$  включен делитель, составленный из пяти последовательно включенных резисторов. Отводы этого делителя необходимо соединять со входом следующего каскада (конденсатор  $C_3$ ).

Общая точка входа и выхода усилителей соединена с положительным выводом источника питания (+20 В), поэтому подключение напряжения питания осуществляется присоединением только отрицательного зажима (—20 В).

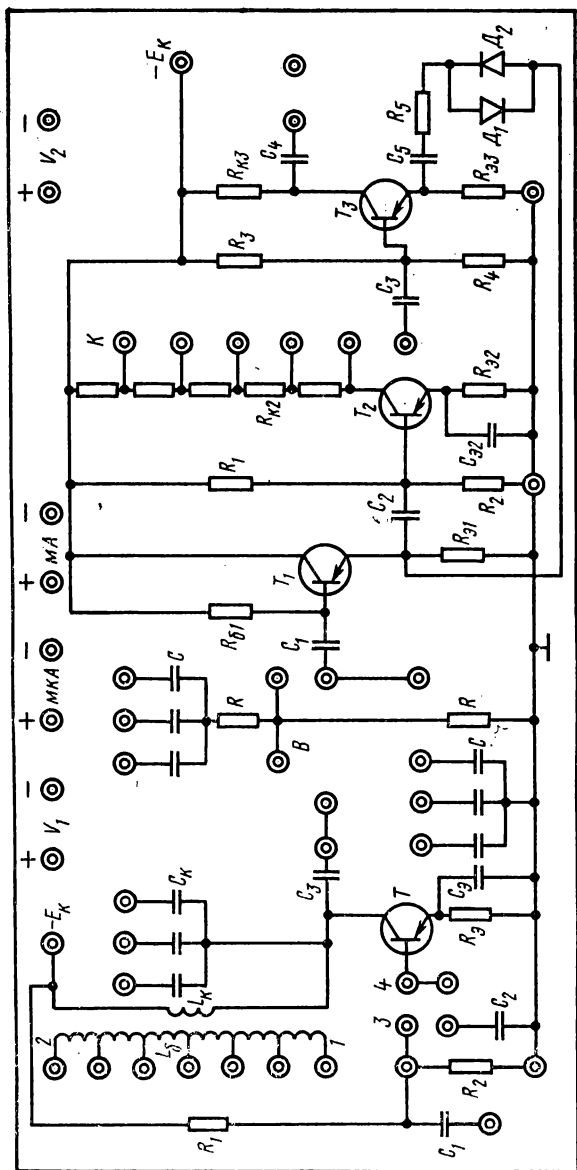


Рис. 9.7. Испытательная панель лабораторного стенда

## ЗАДАНИЕ

А. Выполняется при подготовке к работе

1. Рассчитать резонансную частоту усилителя с контуром  $L_k C_k$  (см. рис. 9.2) при  $L_k = 70$  мГ для трех значений  $C_k$  (5000, 10 000, 20 000 пФ).

2. Рассчитать частоту колебаний автогенератора с мостом Вина при  $R = 51$  кОм для трех значений  $C$  (1500, 3000, 6000 пФ).

Б. Выполняется в лаборатории

1. Собрать резонансный усилитель с контуром  $L_k C_k$ . Определить резонансную частоту  $f_0$  и коэффициент усиления  $K_0$ .

2. Рассчитать, при каком коэффициенте обратной связи  $\beta$  возможно генерирование незатухающих колебаний генератором, использующим исследуемый усилитель.

3. Включив цепь обратной связи и получив режим незатухающих колебаний, измерить амплитуду и частоту генерируемых колебаний при всех значениях коэффициента обратной связи  $\beta$ . Зарисовать форму напряжения в цепи базы, а также на выходе автогенератора. Поменять местами концы катушки обратной связи и объяснить отсутствие генерируемых колебаний.

4. Измерить частоту колебаний автогенератора при других значениях емкости конденсатора коллекторного контура.

5. Определить частоту квазирезонанса  $f_0$  и коэффициент передачи  $\beta_0$  (при  $C = 3000$  пФ) моста Вина.

6. Включить мост Вина в цепь обратной связи двухкаскадного усилителя и, установив коэффициент усиления  $K = 4 \div 6$ , измерить амплитуду и частоту генерируемых колебаний. Зарисовать форму напряжения на выходе автогенератора. Определить значение частоты генерируемых колебаний при изменении емкости конденсатора  $C$ .

7. Изменяя коэффициент усиления усилителя ( $K_{\min} \div K_{\max}$ ), объяснить ухудшение формы генерируемых колебаний при больших значениях  $K$  ( $K_{\max}$ ) и срыв автоколебаний при  $K < 3$ . Зарисовать форму напряжения на выходе автогенератора при  $K = K_{\max}$ .

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

а) Для получения резонансного усилителя на транзисторе необходимо соединить среднюю точку делителя  $R_1R_2$  с базой транзистора  $T$  (рис. 9.7), присоединить конденсатор  $C_K=5000$  пФ параллельно индуктивной катушке  $L_K$ . К выходным зажимам усилителя необходимо присоединить осциллограф и цифровой вольтметр.

Поддерживая неизменным входное напряжение усилителя ( $U_{вх}=20\div 50$  мВ), изменять с помощью звукового генератора частоту входного напряжения в пределах  $2\div 20$  кГц и определить максимальное значение выходного напряжения  $U_{вых0}$ . После этого можно рассчитать коэффициент усиления  $K=U_{вых0}/U_{вх}$ . Чтобы точнее определить резонансную частоту  $f_0$ , необходимо зафиксировать две частоты  $f_1$  и  $f_2$ , на которых выходное напряжение имеет значение  $0,7 U_{вых0}$  ( $f_1 > f_0 > f_2$ ); при этом  $f_0 = (f_1 + f_2)/2$ .

б) Устойчивая работа автогенератора обеспечивается при  $\beta_0 = 1/K_0$  (баланс амплитуд).

в) Для выполнения п. 3 задания необходимо отключить звуковой генератор, включить между точками 3 и 4 (см. рис. 9.7) катушку обратной связи  $L_6$ , а конденсатор  $C_2$  включить параллельно резистору  $R_2$ . Изменяя величину коэффициента обратной связи  $\beta$ , определить, при каком его значении возникает напряжение на выходе автогенератора. Сравнить это значение  $\beta$  со значением, полученным в п. 2. Измерение частоты колебаний автогенератора производится с помощью фигур Лиссажу по экрану осциллографа. При этом напряжение с выхода автогенератора подается, как обычно, на вход усилителя канала вертикального отклонения (канал  $Y$ ). На вход канала горизонтального отклонения (канал  $X$ ) необходимо подать напряжение от звукового генератора. Генератор развертки осциллографа необходимо отключить.

Изменяя частоту напряжения звукового генератора, фиксируют ее значение при возникновении на экране эллипса (круга), что говорит о равенстве частот напряжений, приложенных к пластинам вертикального и горизонтального отклонений электронного луча осциллографа. Измерение частоты колебаний автогенератора

следует производить при всех значениях  $\beta$ , обеспечивающих генерирование колебаний.

Чтобы зарисовать с экрана осциллографа форму напряжения в цепи базы и на выходе автогенератора, необходимо включить генератор развертки осциллографа и получить на экране устойчивое изображение.

г) Подключая параллельно индуктивной катушке  $L_K$  конденсаторы емкостью 10 000 и 20 000 пФ, определить по осциллографу значение частоты автогенератора.

д) Для исследования моста Вина собрать схему (рис. 9.8) ( $C=3000$  пФ,  $R=51$  кОм). Установить напряжение звукового генератора, подаваемое на вход моста Вина,  $U_{вх}=3\div 5$  В и, поддерживая это значение постоянным, определить частоту квазирезонанса моста  $f_0$ , коэффициент передачи  $\beta_0 = U_{вых 0}/U_{вх 0}$ , где  $U_{вх 0}$  — напряжение на входе моста,  $U_{вых 0}$  — напряжение на выходе моста при частоте  $f_0$ .

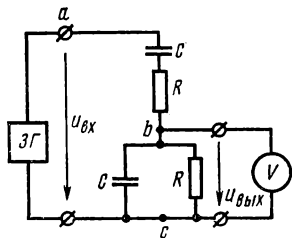


Рис. 9.8. Схема для исследования моста Вина

е) Для включения моста Вина в цепь положительной обратной связи усилителя необходимо вход моста Вина соединить с выходом усилителя, а выход моста Вина — со входом усилителя (см. рис. 9.6). Присоединить вольтметр и осциллограф на выход автогенератора. Измерение частоты производить так, как это было описано ранее.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каково назначение резонансного усилителя в автогенераторе?
2. Какова роль цепи обратной связи в автогенераторе?
3. Каковы условия существования незатухающих колебаний?
4. Что такое баланс амплитуд и баланс фаз?
5. Какова роль источника питания в автогенераторе?
6. В каких случаях используют автогенераторы RC-типа?
7. В каких случаях используют автогенераторы LC-типа?
8. Для чего служат резисторы  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  в генераторе, схема которого изображена на рис. 9.2?
9. Что произойдет, если отключить в генераторе конденсаторы  $C_1$  и  $C_3$  (см. рис. 9.2)?
10. Для чего в генераторе (см. рис. 9.2) необходима индуктивная катушка  $L_3$ ?
11. Как изменится частота колебаний автогенератора LC-типа (см. рис. 9.2), если емкость конденсатора  $C_K$  уменьшить в 4 раза?



12. Как изменится частота колебаний автогенератора  $RC$ -типа (см. рис. 9.6), если емкости конденсаторов  $C$  увеличить в 4 раза?

13. Для чего служит цепь отрицательной обратной связи в автогенераторе  $RC$ -типа (см. рис. 9.6)?

14. Каково назначение каскада на транзисторе  $T_1$  в автогенераторе, схема которого изображена на рис. 9.6?

15. Может ли амплитуда выходного напряжения автогенератора превышать напряжение источника питания?

16. Почему диоды  $D_1$  и  $D_2$  включены так, как показано на схеме рис. 9.6?

17. Почему сопротивление диодов  $D_1$  и  $D_2$  падает с увеличением амплитуды колебаний (см. рис. 9.6)?

18. Изменяется ли резонансная частота усилителя с контуром  $L_k C_k$  при подключении измерительных приборов?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 10

### ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ УСТРОЙСТВ И ЭЛЕКТРОННЫХ РЕЛЕ

**Цель работы:** изучение некоторых распространенных импульсных устройств и электронных реле, а также ознакомление с применением электронного осциллографа для измерений в электрических цепях с импульсными устройствами.

#### КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

В промышленной электронике широко применяются устройства, работающие в импульсном режиме. Импульсный режим (в отличие от режима непрерывной работы) характеризуется тем, что сигналы (изменения тока, напряжения), вырабатываемые в устройстве или воздействующие на него, являются прерывистыми и имеют характер импульсов, действующих в течение короткого промежутка времени.

Форма импульса, т. е. закон изменения во времени величины тока или напряжения, может быть самой разнообразной. Часто используются импульсные сигналы прямоугольной, трапецеидальной, треугольной и экспоненциальной форм.

Последовательность импульсных сигналов характеризуется периодом повторения  $T$  (или частотой повторения  $F=1/T$ ), длительностью импульса  $t$ , скважностью  $Q=T/t$  и амплитудой  $U_m$ .

Используемые на практике импульсные устройства очень разнообразны. Они включают устройства формирования импульсов (ограничители, дифференцирующие и интегрирующие цепи), генераторы импульсов различной формы, устройства для счета числа импульсов и т. д. В работе рассмотрены некоторые импульсные устройства и их использование.

**Ограничители импульсных сигналов.** В импульсных устройствах часто бывает необходимо поддерживать значения напряжения в определенных пределах. Для этого используют ограничители. Ограничитель (рис. 10.1) состоит из диодов  $D_1$  и  $D_2$ , ограничивающего резистора  $R$ , источников постоянной э. д. с.  $E_1$  и  $E_2$ , фиксирующих уровень выходного напряжения.

Если входное напряжение ограничителя положительной полярности меньше, чем  $E_1$  ( $u_{вх} < E_1$ ), то оно проходит на выходные клеммы без изменений:  $u_{вых} = u_{вх}$ , так как диод  $D_2$  включен для него в обратном направлении, а диод  $D_1$  заперт отрицательным напряжением ( $u_{вх} - E_1$ ) и его обратное сопротивление велико ( $R_{обр} \gg R$ ). Если входное напряжение превысит  $E_1$ , то диод открывается (к нему приложено положительное напряжение  $u_{вх} - E_1$ ), его прямое сопротивление мало ( $R_{пр} \ll R$ ), и к выходным клеммам оказывается подключенным источник э. д. с.  $E_1$ . При этом  $u_{вых} = E_1$ . Таким образом, ветвь  $D_1 - E_1$  ограничивает по величине положительные импульсы

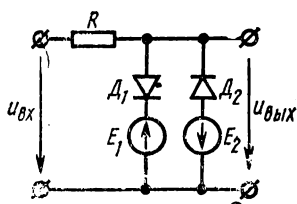


Рис. 10.1. Схема двухстороннего ограничителя

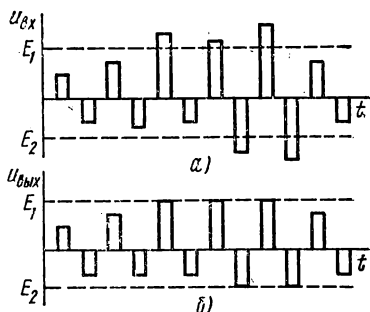


Рис. 10.2. Графики входного (а) и выходного (б) напряжений ограничителя с двусторонним ограничением

входного напряжения. При отрицательной полярности входного напряжения его величину ограничивает ветвь  $D_2 - E_2$ . На рис. 10.2 показаны импульсы входного (рис. 10.2, а) и выходного (рис. 10.2, б) напряжений ограничителя.

Из рис. 10.2 видно, что максимальные и минимальные значения выходного напряжения ограничены значениями э. д. с.  $E_1$  и  $E_2$ . Если величина входного напряжения находится в пределах  $-E_2 < U_{вх} < E_1$ , то  $U_{вых} = U_{вх}$ . Если же  $U_{вх} > E_1$  для положительных импульсов либо  $U_{вх} < -E_2$  для отрицательных, то выходное напряжение ограничивается соответственно величинами  $E_1$  и  $-E_2$ .

Рассмотренные ограничители позволяют легко изменять порог ограничения (изменением  $E$ ). Их недостаток заключается в необходимости использовать источники э. д. с.

Упрощения схемы ограничителей можно достигнуть, используя полупроводниковые диоды — стабилитроны. Известно, что для обратных напряжений величиной  $|U_{обр}| > |E_{ст}|$  полупроводниковый стабилитрон (рис. 10.3, а) может быть представлен схемой замещения (рис. 10.3, б), причем  $R_{ист}$  — внутреннее сопротивление стабилитрона на участке стабилизации (аб). Поскольку внутреннее сопротивление стабилитронов невелико, их можно использовать в ограничителе (рис. 10.3, в), который по своим действиям аналогичен ограничителю, изображенному на рис. 10.1.

Максимальное и минимальные значения выходного напряжения ограничены величиной  $E_{ст}$  стабилитронов. При положительном вход-

ном напряжении ограничивает диод  $D_1$ , а при отрицательном —  $D_2$ .

Качество ограничения определяется тем, насколько выполняется условие  $R \gg R_{\text{пр}}$ , где  $R_{\text{пр}}$  — прямое сопротивление диода.

Графики входного и выходного напряжений для ограничителя (рис. 10.3, в) такие же, как и на рис. 10.2, но под  $E_1$  и  $E_2$  следует понимать  $E_{\text{ст1}}$  и  $E_{\text{ст2}}$ .

Ограничители используют также для ограничения непрерывных (например, синусоидальных) напряжений.

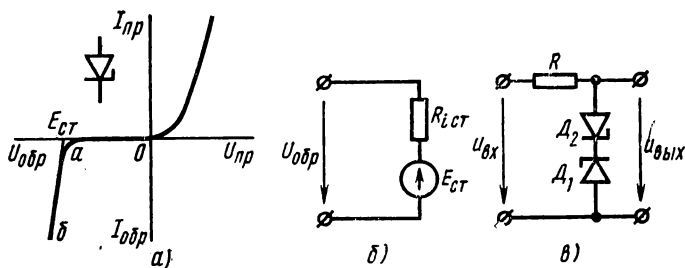


Рис. 10.3. Вольт-амперная характеристика (а), схема замещения (б) полупроводниковых стабилитронов и их включение в двусторонний ограничитель (в)

Таким образом, ограничители позволяют формировать из синусоидального напряжения почти прямоугольные импульсы определенной амплитуды. Все приведенные ранее рассуждения о работе ограничителей при воздействии импульсов напряжения остаются в силе при воздействии синусоидального напряжения. В работе исследуется ограничитель при подаче на его вход синусоидального напряжения.

**Мультивибратор.** Мультивибратор — это генератор прямоугольных импульсов, возникающих за счет заряда и разряда конденсаторов. Мультивибратор (рис. 10.4, а) можно представить как двухкаскадный усилитель с резистивно-емкостной связью, выходное напряжение которого ( $u_{\text{вых}} = u_{\text{к2}}$ ) полностью приложено к его входу, т. е. осуществляется 100%-ная положительная обратная связь.

Мультивибратор работает в режиме генератора незатухающих колебаний, т. е. вырабатывает почти прямоугольные импульсы напряжения (рис. 10.4, б) между коллектором и эмиттером транзистора  $T_2$ . Этот транзистор находится либо в закрытом (интервалы  $t_1$ ,  $u_{\text{к2}} = -E_{\text{к}}$ ), либо в открытом (интервалы  $t_2$ ,  $u_{\text{к2}} > -E_{\text{к}}$ ) состоянии. Переход из закрытого состояния в открытое и обратный (интервалы  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$ ) происходят очень быстро ( $\Delta t_1, \Delta t_2 \ll t_1, t_2$ ). Транзистор  $T_1$  работает в противофазе с транзистором  $T_2$  ( $T_2$  открыт,  $T_1$  закрыт и т. д.). В течение интервалов  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$  оба транзистора открыты, усилитель обладает большим коэффициентом усиления, токи и напряжения транзисторов изменяются очень быстро. Затем следует интервал ( $t_1$  или  $t_2$ ) квазистойчивого (т. е. устойчивого в течение некоторого промежутка времени) состояния, определяемого зарядом и разрядом конденсаторов.

Мультивибратор не может находиться в состоянии, при котором токи и напряжения оставались бы неизменными при открытых транзисторах. Считаем, что схема мультивибратора симметрична, т. е.  $R_{K1}=R_{K2}$ ,  $R_{\delta 1}=R_{\delta 2}$ ,  $C_1=C_2$ , и предположим, что после включения источника питания токи транзисторов одинаковы. Из-за каких-либо причин, например изменения напряжения питания при неидентичности характеристик транзисторов, токи транзисторов становятся неодинаковыми. Допустим,  $i_{K1}$  возрос на некоторую величину, при этом коллекторное напряжение уменьшится по абсолютной величине

$$u_K = -E_K + i_K R_K, \quad (10.1)$$

но

$$u_K = u_C + u_b, \quad (10.2)$$

что вызовет уменьшение абсолютной величины напряжения между базой и эмиттером  $u_{b2}$  второго транзистора, так как согласно второму закону коммутации напряжение на конденсаторе  $u_C$  не может

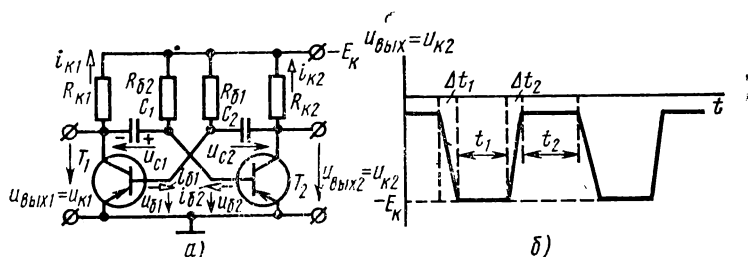


Рис. 10.4. Схема (а) и графики напряжений (б) мультивибратора

измениться мгновенно. Это приведет к уменьшению тока базы ( $i_{b2}$ ) и коллектора ( $i_{K2}$ ), так как  $i_{K2} \approx h_{21} i_{b2}$ , и, согласно уравнению (10.1), для второго транзистора  $T_2$  — к увеличению абсолютного значения  $u_{K2}$  и, следовательно,  $u_{b1}$ . Последнее повлечет за собой увеличение  $i_{b1}$ , т. е. действует положительная обратная связь. Описанный процесс протекает очень быстро, токи транзистора  $T_1$  ( $i_{K1}$  и  $i_{b1}$ ) возрастают до насыщения, а токи транзистора  $T_2$  убывают до нуля, т. е. по окончании такого переходного процесса (интервал  $\Delta t_1$ )  $T_1$  открыт (насыщен),  $T_2$  закрыт. В режиме насыщения рабочая точка на линии нагрузки находится в положении  $a_1$ , а для закрытого транзистора —  $b_1$  (см. рис. 3.6). Можно приблизительно положить, что в режиме насыщения, т. е. для открытого транзистора,  $U_{K, \text{нас}} \approx 0$  и  $I_{K, \text{нас}} \approx E_K / R_K$ , а для закрытого транзистора  $I_K \approx 0$  (так как  $I_b = 0$ ),  $u_K \approx -E_K$ .

Во время предыдущего цикла работы конденсатор  $C_1$  был заряжен почти до напряжения  $E_K$  с полярностью, указанной на рис. 10.4, а. Так как при открытом транзисторе  $T_1$   $u_{K1} \approx 0$ , то обкладка конденсатора, заряженная отрицательно, присоединяется практически к общему зажиму (корпусу). Образуется замкнутая цепь: заряженный конденсатор  $C_1$ , насыщенный транзистор  $T_1$  ( $u_{K1} \approx 0$ ), источник питания  $E_K$ , резистор  $R_{\delta 2}$ . Направление тока в этой цепи таково, что он разряжает конденсатор и стремится зарядить его до напряжения  $-E_K$ . Напряжение  $u_{C1}$  изменяется по закону

$$u_{C1} = E_K (2e^{-t/\tau_1} - 1). \quad (10.3)$$

Постоянная времени

$$\tau_1 \approx C_1 (R_{62} + R_T'), \quad (10.4)$$

где  $R_T'$  — сопротивление насыщенного транзистора  $T_1$ . Так как  $R_{62} \gg R_T'$ , то

$$\tau_1 \approx C_1 R_{62}. \quad (10.5)$$

Практически все напряжение  $u_{c1}$  ( $u_{K1} \ll u_{c1}$ ) приложено между базой и эмиттером второго

транзистора ( $u_{62} \approx u_{c1}$ ). Это положительное напряжение обеспечивает запираание транзистора  $T_2$ . В это же время (интервал  $t_1$ ) происходит заряд конденсатора  $C_2$ , разряженного во время предыдущего периода почти до нуля. Цепь заряда — конденсатор  $C_2$ , резистор  $R_{K2}$ , источник питания  $E_K$ , открытый переход эмиттер — база транзистора  $T_1$ . Постоянная времени

$$\tau_1' = C_2 (R_{K2} + R_T'), \quad (10.6)$$

где  $R_T''$  — сопротивление перехода эмиттер — база. Так как  $R'_{K2} \gg R_T''$ , то

$$\tau_1' \approx C_2 R_{K2} \ll \tau_1 = C_1 R_{62}. \quad (10.6')$$

Следовательно, заряд конденсатора  $C_2$  заканчивается намного быстрее, чем разряд конденсатора  $C_1$ , который и определяет длительность первого интервала ( $t_1$ ) квазистойчивого равновесия мультивибратора.

На рис. 10.5 показаны графики напряжений и токов различных элементов мультивибратора. Из графика напряжения  $u_{62}$  видно, что это запирающее транзистор  $T_2$  напряжение, убывая, достигает нуля, транзистор  $T_2$  приоткрывается, появятся токи  $i_{62}$  и  $i_{K2}$ , напряжение  $u_{K2}$  уменьшится, т. е. в этом случае действует положительная обратная связь, как это уже было описано ранее. В результате токи транзистора  $T_2$  возрастут до насыщения (интервал  $\Delta t_2$ ), т. е. транзистор  $T_2$  будет открыт, а  $T_1$  при этом закрывается. Происходят (при открытом  $T_2$  и закрытом  $T_1$ ) относительно медленный разряд кон-

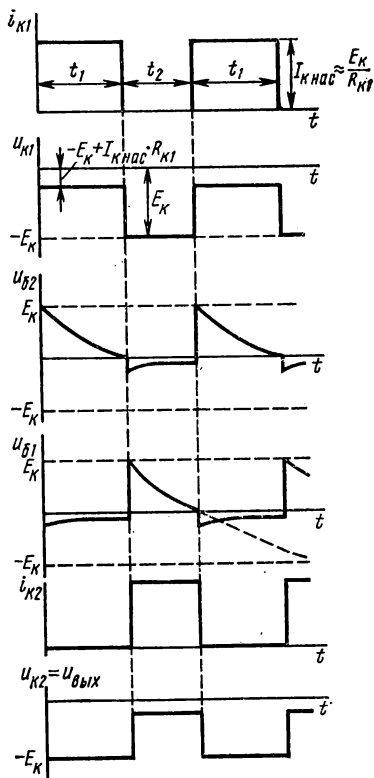


Рис. 10.5. Графики напряжений и токов различных элементов мультивибратора

В результате токи транзистора  $T_2$  возрастут до насыщения (интервал  $\Delta t_2$ ), т. е. транзистор  $T_2$  будет открыт, а  $T_1$  при этом закрывается. Происходят (при открытом  $T_2$  и закрытом  $T_1$ ) относительно медленный разряд кон-

денсатора  $C_2$  с постоянной времени

$$\tau_2 \approx C_2 R_{61} \quad (10.7)$$

и быстрый заряд конденсатора  $C_1$ .

Напряжение  $u_{c2} = u_{61}$  запирает транзистор  $T_1$  и определяет длительность второго интервала ( $t_2$ ) квазистойчивого равновесия мультивибратора. Период колебаний мультивибратора

$$T \approx t_1 + t_2, \quad (10.8)$$

где  $t_1, t_2$  — интервалы полного разряда конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$  от максимального значения (примерно  $E_K$ ) до напряжения отпирания транзисторов (около 0):

$$t_1 \approx 0,7\tau_1 = 0,7C_1 R_{62}, \quad (10.9)$$

$$t_2 \approx 0,7\tau_2 = 0,7C_2 R_{61}$$

и

$$T \approx 0,7 (C_1 R_{62} + C_2 R_{61}). \quad (10.10)$$

Для симметричного мультивибратора  $C_1 = C_2 = C$ ,  $R_{61} = R_{62} = R_6$  и

$$T \approx 1,4CR_6. \quad (10.10')$$

Перепады коллекторных напряжений транзисторов  $T_1$  и  $T_2$  от состояния насыщения ( $u_{к.мин} = u_{к.нас} = -E_K + I_{к.нас}R_K \approx 0$ ) при открытом транзисторе, до  $-E_K$  при закрытом транзисторе — формируют импульсы выходного напряжения. Если необходимо изменить период повторения напряжений мультивибратора, то резисторы  $R_{61}$  и  $R_{62}$  присоединяют к движку потенциометра (рис. 10.6), при этом конденсаторы  $C_1$  и  $C_2$  перезаряжаются от напряжения  $E_K$  до напряжения  $-U_0$  ( $U_0 < E_K$ ). Разряд конденсаторов при этом происходит медленнее, т. е. период увеличивается при перемещении движка потенциометра сверху вниз. В лабораторной работе исследуется транзисторный мультивибратор с регулируемым периодом выходного напряжения.

**О д н о в и б р а т о р.** Мультивибраторы являются генераторами незатухающих колебаний, так как запирающее напряжение между базой и эмиттером транзисторов, уменьшаясь, достигает уровня отпирания и мультивибратор периодически переходит из одного квазистойчивого состояния в другое. Чтобы перевести мультивибратор в режим генерирования одиночных импульсов, необходимо одно из квазистойчивых состояний сделать устойчивым, подав запирающее напряжение между базой и эмиттером одного из транзисторов. Такой «заторможенный» мультивибратор называется *одновибратором* или *ждушим мультивибратором*. На рис. 10.7 приведена схема одновибратора, в котором запирающее напряжение создается источником э. д. с.  $E_6$ , включенным в цепь базы транзистора  $T_1$ . Обратная связь с выхода одновибратора на базу транзистора  $T_1$  обеспечивается с помощью делителей  $R_{61}'$  и  $R_{61}''$ . В исходном (устойчивом) состоянии транзистор  $T_1$  закрыт положительным напряжением

$$U_{61} = E_6 - \frac{(E_K - I_{к.нас}R_{K2})R_{61}''}{R_{61}' + R_{61}'}, \quad (10.11)$$

где  $I_{к.нас}$  — ток насыщения открытого транзистора  $T_2$ . Конденсатор  $C_1$  заряжен примерно до напряжения  $E_k$ . Если на вход такого мультивибратора поступает положительный импульс входного напряжения, то он передается на базу транзистора  $T_2$  и последний начинает закрываться, действует положительная обратная связь и по окончании этого быстрого процесса транзистор  $T_1$  будет открыт, а  $T_2$  закрыт. Конденсатор  $C_1$  разряжается и поддерживает закрытое состояние транзистора  $T_2$ . Это состояние мультивибратора неустойчиво, оно заканчивается перебросом в первоначальное устойчивое состояние, как только напряжение  $u_{б2}$ , уменьшаясь, отпирает транзистор  $T_2$ .

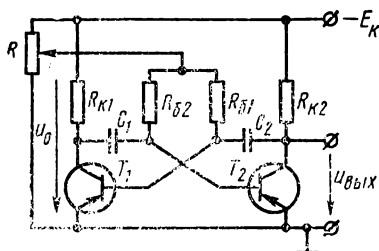


Рис. 10.6. Схема мультивибратора с регулировкой частоты

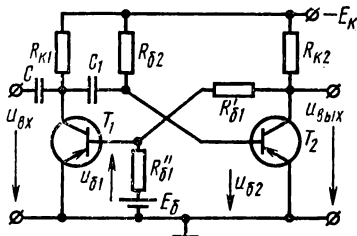


Рис. 10.7. Схема ждущего мультивибратора (одновибратора)

В этом состоянии мультивибратор находится до прихода следующего входного (положительного) импульса. Одновибратор может быть использован для преобразования импульсов произвольной величины и длительности в импульсы фиксированной величины и длительности  $t_{вых}$ , определяемой разрядом конденсатора  $C_1$ :

$$t_{вых} \approx 0,7 C_1 R_{б2}. \quad (10.12)$$

**Триггер.** Триггером называется спусковое устройство, обладающее двумя устойчивыми состояниями. Переход из одного состояния в другое происходит под действием внешних запускающих импульсов. На рис. 10.8 представлена одна из возможных схем триггера на транзисторах.

Триггер представляет собой двухкаскадный усилитель постоянного тока с положительной обратной связью. Как и в мультивибраторе, состояние, при котором оба транзистора открыты, неустойчиво, малейшие флуктуации при наличии положительной обратной связи приводят к тому, что один из транзисторов будет открыт, а второй — закрыт положительным напряжением

$$U_б = E_б - \frac{(E_k - I_{к.нас} R_k) R_2}{R_1 + R_2}. \quad (10.13)$$

В другое устойчивое состояние триггер может перейти при действии положительных входных импульсов, подаваемых через диоды  $D_1$  и  $D_2$  одновременно к обоим транзисторам. При появлении в цепи базы положительного напряжения насыщенный транзистор начинает запирается и под действием положительной обратной связи триггер переходит в другое устойчивое состояние. Таким образом, каждый

импульс входного напряжения вызывает переброс триггера. Частота следования выходных импульсов триггера вдвое меньше, чем входных, поэтому при помощи триггеров осуществляется пересчет (деление на 2) числа импульсов. Для ускорения процесса перехода триггера из одного устойчивого состояния в другое включены конденсаторы  $C_1$  и  $C_1'$ . Так как напряжение на конденсаторе не может измениться мгновенно, то быстрые изменения коллекторных напряжений передаются в базовые цепи без ослаблений.

Триггеры используются для счета импульсов, переключения в электронных цепях, формирования прямоугольных импульсов и т. д. В вычислительных машинах их применяют для запоминания, осуществления логических и арифметических операций.

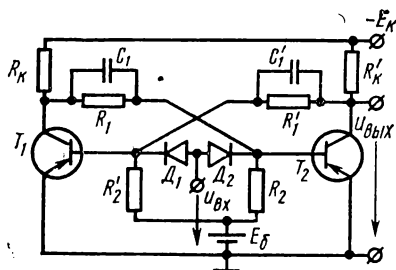


Рис. 10.8. Схема триггера на транзисторах

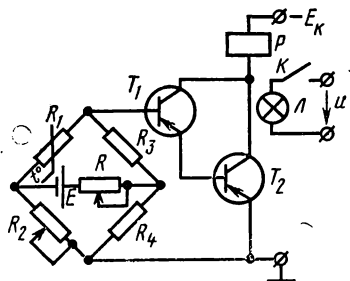


Рис. 10.9. Схема теплового реле

В лабораторной работе исследуется работа триггера в режиме формирования прямоугольных импульсов при различной форме входного напряжения.

**Релейные схемы.** Электронные реле используются для сигнализации о том, что контролируемая величина (ток, напряжение, интервал времени, температура, давление и т. д.) превысила заданное значение, называемое *порогом срабатывания*. Сигнал на выходе электронных реле может принимать лишь два дискретных значения в зависимости от того, превышает входная величина порог срабатывания или нет. Различают в зависимости от рода входной величины реле времени для отсчета интервалов времени, тепловые реле для сигнализации о превышении температурой заданного значения, реле напряжения и т. д.

Электронные реле могут быть построены на основе усилителей, триггеров, ждущих мультивибраторов и других устройств.

На рис. 10.9 приведена схема теплового реле, которое включает сигнальную лампу Л, если температура превысит заданное значение. Преобразователь изменений температуры — терморезистор  $R_1$  типа КМТ-10 — включен в одно из плеч моста постоянного тока; балансировка моста производится с помощью переменного резистора  $R_2$  при номинальной температуре. При этом напряжение разбаланса  $U_{вых} = 0$ . Ток через обмотку реле Р, включенного в коллекторную цепь усилителя постоянного тока, имеет очень малую величину. Сигнальная лампа отключена нормально разомкнутым контактом К реле Р.



## ОПИСАНИЕ ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ ПАНЕЛИ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Диодный ограничитель собран по схеме, изображенной на рис. 10.3, в.

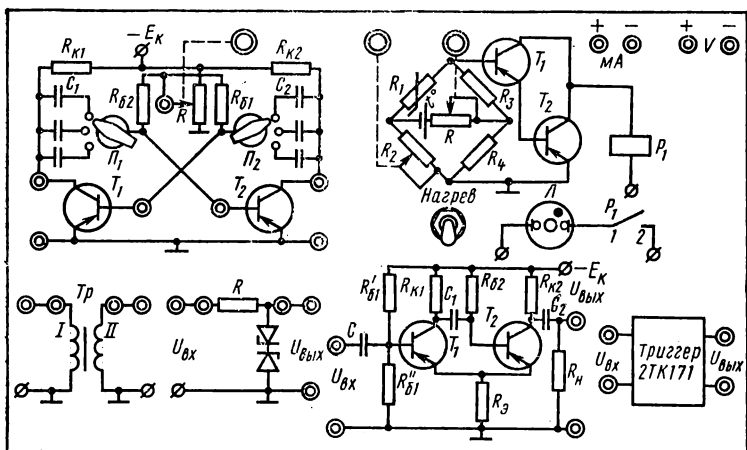


Рис. 10.10. Испытательная панель лабораторного стенда

Недостатком одновибратора, схема которого изображена на рис. 10.7, является наличие дополнительного источника питания  $E_6$ . В лабораторной работе исследуется одновибратор с эмиттерной связью, в которой запирающее напряжение на транзисторе  $T_1$  обеспечивается за счет падения напряжения на резисторе  $R_9$  (рис. 10.10). Резисторы  $R'_{61}$  и  $R''_{61}$  служат для создания напряжения смещения между ба-

зой и эмиттером транзистора  $T_1$ . Конденсаторы  $C$  и  $C_2$  являются разделительными. Входное напряжение вызывает отпирание транзистора  $T_1$  и запираание транзистора  $T_2$ , в остальном работа одновибратора происходит так, как это было описано ранее.

Генератор напряжения сложной формы, выходное напряжение которого подается на одновибратор, собран на основе трансформатора. Триггер собран по схеме, аналогично рис. 10.8, на микросхеме 2ТК171. Подогрев терморезистора в тепловом реле производится включением тумблера «Нагрев».

### ЗАДАНИЕ

А. Выполняется при подготовке к работе

1. К диодному ограничителю, используемому в лабораторной работе, приложено входное напряжение  $u_{вх} = 12,6 \sin 314 t$  [В]. Нарисовать графики входного и выходного напряжений ограничителя, если максимальный и минимальный уровни ограничения одинаковы (8 В).

2. Рассчитать составляющие  $t_1$  и  $t_2$  периода колебаний мультивибратора, если  $R_{61} = R_{62} = 20$  кОм, а значения емкостей (мкФ) конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$  даны в табл. 10.1 для каждой бригады. Определить частоту повторения.

Таблица 10.1

Конденсатор	Номер бригады							
	1 9	2 10	3 11	4 12	5 13	6 14	7 15	8
$C_1$	0,01	0,01	0,05	0,1	0,05	0,1	0,01	0,1
$C_2$	0,05	0,1	0,01	0,01	0,1	0,05	0,01	0,1

Б. Выполняется в лаборатории

1. Включить диодный ограничитель и зарисовать осциллограммы входного и выходного напряжений. Сравнить с графиками, полученными при подготовке к работе. Измерить максимальные значения входного и выходного напряжений ограничителя.

2. Включить мультивибратор и установить те значения емкостей конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$ , которые приведены

в табл. 10.1. При верхнем положении движка потенциометра  $R$ :

а) зарисовать осциллограммы базового и коллекторного напряжений; б) измерить составляющие  $t_1$  и  $t_2$  периода колебаний напряжения мультивибратора и сравнить с расчетными значениями.

3. Изменяя значения емкостей конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$ , проверить их влияние на период изменения напряжения мультивибратора. Изменяя положение движка потенциометра  $R$ , определить пределы регулировки периода изменения напряжения.

4. Включить одновибратор и зарисовать осциллограммы входного и выходного напряжений одновибратора при запуске его последовательностью выходных импульсов с ограничителя.

5. Зарисовать осциллограммы напряжения на выходе генератора напряжения сложной формы и выходного напряжения одновибратора при запуске его от генератора напряжения сложной формы.

6. Проверить работу триггера в режиме запуска импульсами мультивибратора.

7. Включить последовательно генератор напряжения сложной формы, одновибратор и триггер и зарисовать осциллограммы напряжений на входе и выходе каждого каскада.

8. Включить тепловое реле и, сбалансировав схему, подогревать терморезистор до температуры, при которой сработает реле.

### **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ**

В лабораторной работе измерение длительности импульсов производится с помощью электронного осциллографа по известной длительности пилообразного напряжения генератора развертки. Например, переключатель положения «Развертка» указывает 200 мкс/см, измерение временного интервала по экрану осциллографа дает 2,5 см, следовательно, длительность интервала  $t = 200 \text{ мкс/см} \times 2,5 \text{ см} = 500 \text{ мкс}$ .

Аналогично, измеряя максимальное значение импульсов напряжения на экране осциллографа ( $h$ , см) и зная чувствительность канала вертикального усиления ( $S$ ,

В/см), можно найти максимальное значение как  $U_{\text{макс}} = Sh$ .

Приводя в отчете осциллограммы, относящиеся к работе данного устройства, необходимо их располагать одну под другой соответствующим образом, как, например, это показано на рис. 10.5. На осциллограммах необходимо проводить оси абсцисс и ординат с указанием масштабов по этим осям (по оси абсцисс — в мкс/см, ординат — в В/см). Усиление осциллографа необходимо выбирать таким, чтобы изображение занимало по вертикали около  $\frac{3}{4}$  экрана.

Далее приведены рекомендации по выполнению лабораторного задания.

а) Напряжение частотой 50 Гц подается на вход ограничителя со вторичной обмотки трансформатора  $Tr$  и включается тумблером, расположенным в правой части стенда. Переключатель рода работ генератора, синхронизирующего напряжение развертки осциллографа, поставить в положение «От сети». Для удобства измерений максимальных значений напряжений необходимо зарисовывать осциллограммы входного и выходного напряжений ограничителя при одном и том же усилении усилителя вертикального отклонения луча осциллографа.

б) Переключение конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$  производится с помощью переключателей  $П_1$  и  $П_2$ . Обратить внимание на отличие экспериментальных осциллограмм от графиков, иллюстрирующих работу мультивибратора (см. рис. 10.5).

Измерив  $t_1$  и  $t_2$ , рассчитать частоту повторения импульсов мультивибратора  $F = 1/T = 1/(t_1 + t_2)$ . Частота  $F$  должна быть выражена в герцах, а интервалы времени  $t_1$  и  $t_2$  — в секундах.

в) Рекомендуются измерить по два значения периода изменения напряжения  $T$  при изменении отдельно  $C_1$  и  $C_2$ , а затем при их одновременном изменении. Обратить внимание, изменяются ли оба интервала  $t_1$  и  $t_2$  при изменении  $C_1$  (или  $C_2$ ).

Отметить минимальное и максимальное значения периода изменения напряжения мультивибратора.

г) Балансировка моста теплового реле производится с помощью переменного резистора  $R_2$  при выключенном источнике питания транзисторов. Чтобы зафиксировать положение равновесия, необходимо включить измеритель тока на пределе измерения 10 мА в диагональ моста и

повышать чувствительность измерителя до 100 мкА по мере приближения к положению равновесия. Убедиться, что величина сопротивления резистора  $R$  не влияет на баланс моста. Сбалансировав мост, установить порог срабатывания (5, 10, 20°С), т. е. превышение температуры срабатывания реле по отношению к нормальной.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Для чего используют ограничители в электронных устройствах?
2. Какое свойство полупроводниковых стабилитронов используется при применении их в ограничителях?
3. Чем определяется качество ограничения при использовании стабилитронов?
4. Что такое мультивибратор?
5. В какие интервалы времени (см. рис. 10.4) открыты оба транзистора?
6. Чем определяется длительность интервалов квазистойчивого состояния мультивибратора?
7. Почему транзисторы в мультивибраторе не могут быть открыты в течение длительных интервалов времени?
8. Изменится ли период повторения напряжения мультивибратора при увеличении (уменьшении) емкости конденсатора  $C_1$  (или  $C_2$ ) (см. рис. 10.4, а)?
9. Изменится ли период повторения напряжения мультивибратора при небольших изменениях сопротивления резисторов  $R_{к1}$  и  $R_{к2}$ ?
10. Если сопротивления резисторов  $R_{б1}$  и  $R_{б2}$  увеличились вдвое, то как изменится период  $T$  напряжения мультивибратора?
11. Каково назначение одновибратора?
12. В чем отличие мультивибратора от одновибратора?
13. Чем определяется длительность импульса на выходе одновибратора?
14. Каково назначение триггера?
15. Чем определяется длительность импульсов на выходе триггера?
16. Как изменяется сопротивление терморезистора при повышении температуры?
17. Каково назначение теплового реле?

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 11

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Цель работы: ознакомление с характеристиками и применением полупроводниковых приборов — туннельного диода, варикапа, полевого транзистора.

## КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

**Туннельные диоды.** Вольт-амперная характеристика туннельных диодов (рис. 11.1) имеет участок с отрицательным сопротивлением ( $ab$ ), благодаря которому они могут усиливать сигналы.

Туннельный диод формируется из полупроводниковых слоев с электропроводностью  $p$ - и  $n$ -типа с малым сопротивлением, т. е. с большой концентрацией примесей ( $10^{18} \div 10^{20}$  атомов/см<sup>3</sup>); в обычных полупроводниковых диодах примесей не более  $10^{17}$  атомов/см<sup>3</sup>. На границе полупроводников  $p$ - и  $n$ -типов возникает запирающий слой (рис. 11.2), т. е. двойной электрический слой неподвижных ионов, который препятствует движению основных носителей зарядов через зону контакта. На рис. 11.2 кружками показаны неподвижные ионы кристаллических решеток полупроводников, знаками «+», «-» отмечены основные носители зарядов (электроны и дырки). Ввиду большой концентрации примесей и малой ширины  $p$ - $n$ -перехода напряженность электрического поля в переходе  $\sim E_{зап}$  достигает  $10^7 \div 10^8$  В/м. При таких значениях  $E_{зап}$  появляется большая вероятность так называемого *туннельного эффекта*, который заключается в том, что некоторая часть носителей зарядов может преодолеть запирающий слой.

Если внешнее напряжение отсутствует ( $U=0$ ), то количество таких переходов из полупроводника  $p$ -типа в полупроводник  $n$ -типа и обратных переходов одинаково и их результирующий ток равен нулю. Необходимо отметить, что, как и в обычных, в туннельном диоде также существует поток основных носителей, преодолевающих запирающий слой и создающих через  $p$ - $n$ -переход ток  $i_0$ , и поток неосновных носителей, обусловленный электрическим полем  $E_{зап}$  и создающий ток  $i_n$ . Эти два тока ( $i_0$  и  $i_n$ ) направлены противоположно. Таким образом, результирующий ток  $\dot{I}_\Sigma$  через запирающий слой

$$\dot{I}_\Sigma = i_{T p \rightarrow n} - i_{T n \rightarrow p} + i_0 - i_n, \quad (11.1)$$

где  $i_{T p \rightarrow n}$ ,  $i_{T n \rightarrow p}$  — токи, обусловленные туннельными переходами из одного полупроводника в другой.

При небольших значениях внешнего напряжения в туннельных диодах  $i_{T p \rightarrow n}$  ( $i_{T n \rightarrow p}$ )  $\gg i_0$  ( $i_n$ ).

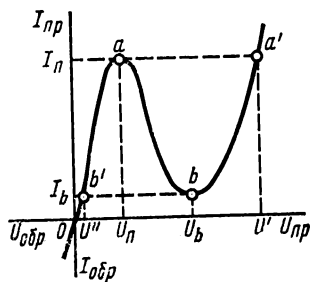


Рис. 11.1. Вольт-амперная характеристика туннельного диода

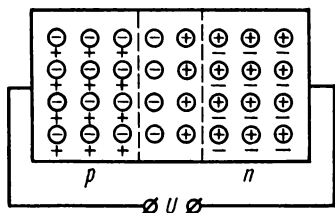


Рис. 11.2. Структура  $p$ - $n$ -перехода туннельного диода

Если приложенное к  $p$ - $n$ -переходу в проводящем направлении напряжение возрастает, то количество туннельных переходов (переходов из  $p$ -области в  $n$ -область) увеличивается, следовательно,  $i_{T\ p \rightarrow n} > i_{T\ n \rightarrow p}$  и появляется результирующий ток диода в прямом направлении (участок  $Oa$  характеристики рис. 11.1). При некотором значении напряжения  $U_n$  количество туннельных переходов достигает максимума (ток достигает пикового значения  $I_n$ ).

При увеличении напряжения свыше  $U_n$  количество туннельных переходов ( $p \rightarrow n$  и  $n \rightarrow p$ ) сокращается и при некотором напряжении  $U_v$  становится равным нулю. Прямой ток при этом уменьшается (участок  $ab$ ) и достигает минимального значения  $I_v$ . Дальнейшее увеличение напряжения приводит, как и в обычных диодах, к возрастанию тока основных носителей заряда ( $i_0$ ), образующих ток диода в проводящем направлении  $i_{пр}$ .

Величина пикового тока туннельных диодов достигает нескольких миллиампер ( $2 \div 5$ ), а отношение  $I_n/I_v$  имеет значение  $5 \div 20$  в зависимости от типа использованных полупроводников.

Напряжение  $U_n$  имеет значение  $30 \div 100$  мВ,  $U_v = 200 \div 600$  мВ. Модуль отрицательного дифференциального сопротивления на участке  $ab$  имеет приближенное значение

$$R_{диф} = (U_v - U_n)/(I_n - I_v) = \Delta U / \Delta I; \quad (11.2)$$

$R_{диф}$  может достигать нескольких десятков или сотен ом.

Наличие участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением дает возможность использовать туннельный диод в усилителях, генераторах синусоидальных и релаксационных колебаний, в переключающих устройствах с частотами до сотен и тысяч мегагерц.

На рис. 11.3 приведена схема релаксационного генератора на туннельном диоде. В генераторе имеется источник питания  $E$  (считаем его внутреннее сопротивление равным нулю), делитель напряжения, состоящий из резисторов  $R_1'$  и  $R_1''$ , индуктивная катушка (с индуктивностью  $L$  и активным сопротивлением  $r_L$ ), включенная последовательно с диодом. Резисторы делителя  $R_1'$  и  $R_1''$  выбирают

такими, чтобы для напряжения  $U_{0\ x.x} = E \frac{R_1'}{R_1' + R_1''}$  (при отключении

диода) выполнялось соотношение

$$U_n < U_0 < U_v, \quad (11.3)$$

т. е. чтобы рабочая точка находилась на участке  $ab$  с отрицательным сопротивлением  $R_{диф}$ . Чтобы в генераторе возникли релаксационные колебания, необходимо, чтобы активное сопротивление катушки  $r_L$  и

сопротивление  $R_1 = \frac{R_1' R_1''}{R_1' + R_1''}$  были меньше модуля дифференциаль-

ного сопротивления  $R_{диф}$  диода в рабочей точке.

При включении генератора ток через туннельный диод  $i_d$  и напряжение  $U_d$  плавно возрастают в соответствии с участком  $Oa$  характеристики (см. рис. 11.1). Когда ток возрастает до значения  $I_n$  (точка  $a$ ), напряжение генератора скачком увеличивается от значения  $U_n$  до  $U'$  (точка  $a'$  характеристики). После этого начинается процесс плавного уменьшения тока и напряжения в соответствии с участком

$a'b$  характеристики. От значения, соответствующего точке  $b$ , напряжение скачком уменьшится до значения, соответствующего точке  $b'(U'')$ . Затем процесс повторяется, т. е. ток  $i_d$  и напряжение  $U_d$  возрастают (участок  $b'a$ ) и т. д. На рис. 11.4 изображен описанный процесс изменения напряжения на зажимах туннельного диода  $U_d$ . Видны отмеченные скачки напряжения (от  $U_n$  до  $U'$  и от  $U_b$  до

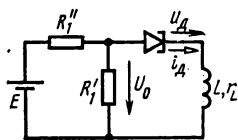


Рис. 11.3. Схема релаксационного генератора на туннельном диоде

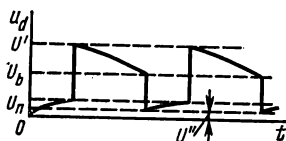


Рис. 11.4. График изменения напряжения на зажимах туннельного диода  $U_d$  в схеме релаксационного генератора

$U''$ ). График изменения напряжения на индуктивной катушке  $U_L$  можно получить вычитанием из напряжения  $U_0$  напряжения  $U_d$ .

**Варикапы.** Варикапами называют полупроводниковые диоды, используемые в электронных устройствах в качестве регулируемых конденсаторов. У варикапов емкость зависит от приложенного напряжения. Действительно, зона  $p$ - $n$ -перехода напоминает кон-

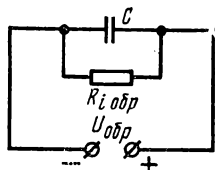


Рис. 11.5. Упрощенная эквивалентная схема замещения варикапа

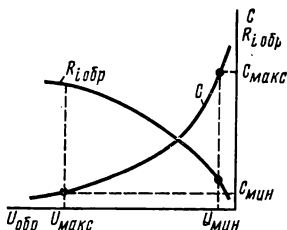


Рис. 11.6. Зависимость величины емкости и сопротивления варикапа от напряжения

денсатор, пластины которого заряжены разноименными зарядами. При приложении к переходу обратного (запирающего) напряжения зона  $p$ - $n$ -перехода расширяется, а емкость, соответствующая такому переходу, уменьшается.

Эквивалентная упрощенная схема замещения  $p$ - $n$ -перехода, к которому приложено обратное напряжение  $U_{обр}$ , изображена на рис. 11.5. На этой схеме  $R_{iобр}$  — внутреннее сопротивление, а  $C$  — эквивалентная емкость  $p$ - $n$ -перехода. В этой схеме сопротивление  $R_{iобр}$  и емкость  $C$  являются нелинейными, так как их значения зависят от величины обратного напряжения.



На рис. 11.6 изображены зависимости величины емкости  $C$  и сопротивления  $R_{\text{доб}}$  от приложенного обратного напряжения. При малых напряжениях емкость имеет максимальное значение, а сопротивление — минимальное. С увеличением абсолютного значения напряжения величина емкости, как отмечалось, уменьшается, а сопротивление возрастает. Это явление имеет место у всех полупроводниковых диодов. Специально сконструированные для этой цели варикапы имеют значительный диапазон изменения емкости при достаточно больших значениях  $R_{\text{доб}}$ .

Обычно к варикапу прикладываются небольшое переменное ( $U \sim$ ) напряжение и постоянное напряжение смещения ( $U_{\text{см}} \gg U \sim$ ), величина которого может регулироваться от  $U_{\text{макс}}$  до  $U_{\text{мин}}$ . При этом значение емкости для переменной составляющей напряжения изменяется от  $C_{\text{мин}}$  до  $C_{\text{макс}}$  с коэффициентом перекрытия

$$q = C_{\text{макс}}/C_{\text{мин}}. \quad (11.4)$$

Величина напряжения смещения имеет значение от единиц до десятков вольт, максимальное значение емкости — несколько десятков пикофард, коэффициент перекрытия по емкости — несколько единиц ( $3 \div 4$ ).

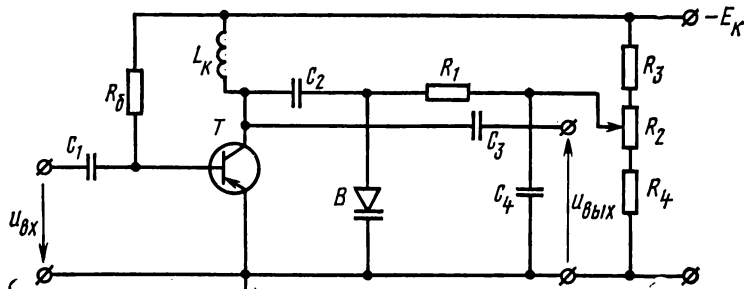


Рис. 11.7. Схема резонансного усилителя на транзисторе  $T$  с варикапом

Варикапы широко используются в радиотехнике и электронике в качестве управляемых конденсаторов. Они могут применяться на частотах до нескольких тысяч мегагерц.

Управление может быть сделано дистанционным. Это осуществляется с помощью напряжения. Кроме того, варикапы могут использоваться в параметрических усилителях, где усиление сигнала осуществляется за счет периодического изменения емкости варикапа.

На рис. 11.7 изображена схема резонансного усилителя на транзисторе  $T$ . Резонансные усилители, использующие явление резонанса колебательного контура, предназначены для избирательного усиления сигналов определенной частоты. Колебательный контур в коллекторной цепи составлен параллельно включенными индуктивной катушкой  $L_k$  и варикапом  $B$ . Емкость варикапа  $C_B$  регулируется с помощью резистора  $R_2$  изменением напряжения, подаваемого на варикап. Резистор  $R_1$  и конденсатор  $C_4$  предотвращают попадание усиленного напряжения сигнала в цепь регулирования. Конденсатор  $C_2$  ( $C_2 \gg C_B$ ) исключает влияние коллекторного напряжения на емкость варикапа.

Резонансная частота усилителя определяется по обычной формуле

$$\omega_c \approx 1/\sqrt{L_k C_B}. \quad (11.5)$$

Конденсаторы  $C_1$  и  $C_3$  играют роль разделительных и исключают влияние постоянного напряжения транзистора на цепь источника сигнала и на выходную цепь.

Резисторы  $R_3$  и  $R_4$  служат для установления пределов изменения напряжения смещения ( $U_{см. макс.}$ ,  $U_{см. мин.}$ ). В лабораторной работе исследуется изменение емкости варикапа при изменении напряжения смещения.

**Полевые транзисторы.** Полевой, или униполярный, транзистор — один из сравнительно новых полупроводниковых приборов, широко применяемых во многих электронных устройствах. Полевые транзисторы — общее название усилительных полупроводниковых приборов, у которых выходная цепь не содержит  $p$ - $n$ -переходов и ток в этой цепи определяется электрическим полем объемного заряда управляющего электрода.

Используемый в полевых транзисторах механизм усиления обусловлен движением только основных носителей заряда — дырок или электронов в полупроводнике (полупроводниковом канале) — соответственно  $p$ - или  $n$ -типа.

Полевой транзистор с каналом  $n$ -типа (рис. 11.8) содержит прямоугольный стержень 1 из германия с электронной электропроводностью ( $n$ -типа). Стержень снабжен выводами 2, 4. Вывод, от которого основные носители начинают свой путь в канале, называется истоком, другой вывод — стоком. К выводам стержня через контакты 2 и 4 подается напряжение  $U_c$ , создающее выходной ток прибора. Вокруг центральной части стержня путем сплавления образуется область с электропроводностью  $p$ -типа. Таким образом, канал  $n$ -типа окружен в большей своей части  $p$ - $n$ -переходом, который называется затвором 3.

Выходной (стоковый) ток транзистора  $I_c$  в канале определяется величиной напряжения  $U_c$ , приложенного к каналу, и сопротивлением последнего, которое в свою очередь зависит от поперечного сечения канала. К затвору ( $p$ - $n$ -переходу) прикладывается обратное напряжение. Ширина зоны  $p$ - $n$ -перехода, обедненная зарядами, зависит от величины напряжения, как это отмечалось при рассмотрении варикапов. Зона  $p$ - $n$ -перехода расширяется при этом в глубь  $n$ -области, оставляя для прохождения носителей от истока к стоку канал, сечение которого определяется величиной отрицательного напряжения смещения  $p$ - $n$ -перехода.

Так как к торцовым областям канала приложено напряжение  $U_c$ , то вдоль канала существует падение напряжения. Вследствие этого

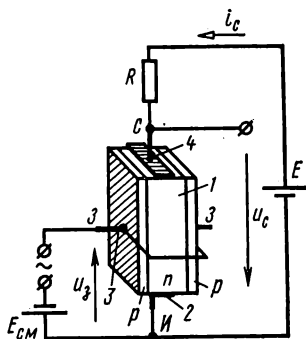


Рис. 11.8. Схематическое устройство полевого транзистора с каналом  $n$ -типа

величина обратного напряжения, действующего на  $p$ - $n$ -переход, не остается постоянной вдоль канала по направлению от истока к стоку. Наибольшей величины это напряжение достигает в области затвора, прилежащей к стоку, поэтому здесь сечение канала получается наименьшим. При некотором значении приложенного к затвору напряжения глубина проникновения области, обедненной носителями заряда, возрастает настолько, что канал перекрывается. Это напряжение называется напряжением отсечки ( $U_{отс}$ ).

Если произошло перекрытие канала возле стока, то дальнейшее увеличение напряжения  $U_c$ , приложенного между стоком и истоком, не вызывает возрастания тока (область насыщения).

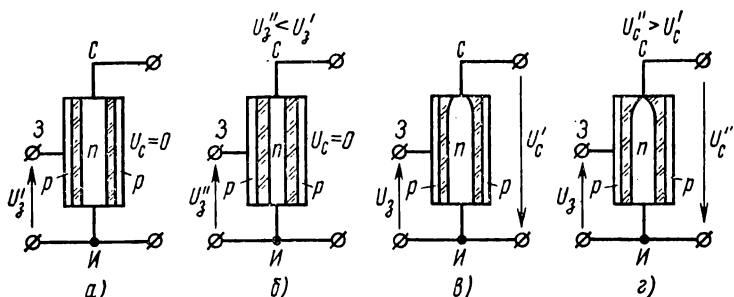


Рис. 11.9. Распространение области  $p$ - $n$ -перехода при изменении  $U_a$  и  $U_c$

На рис. 11.9 изображено распространение области  $p$ - $n$ -перехода при изменении  $U_a$  и  $U_c$ . Если  $U_c = 0$  и напряжение  $U_a$  становится более отрицательным (рис. 11.9, а, б), то область  $p$ - $n$ -перехода равномерно распространяется в глубь канала. Если приложено некоторое напряжение сток — исток  $U_c = U_c'$  (рис. 11.9, в), это вызывает сужение канала, увеличивающееся по направлению от истока к стоку. В самом узком месте канала (возле стока) обратное напряжение, приложенное к  $p$ - $n$ -переходу, максимально и имеет величину  $|U_a| + U_c$ . При увеличении напряжения  $U_c$  канал смыкается (рис. 11.9, г). Максимальное значение напряжения  $U_c$  ограничено значением  $U_{c,п'}$ , при котором в канале может наступить пробой, что приводит к выходу прибора из строя. Таким образом, стоковый (выходной) ток  $I_c$  транзистора управляется величиной отрицательного смещения затвора  $U_a$ . Величина тока затвора очень мала и определяется фактически обратным током  $p$ - $n$ -перехода (единицы и десятки микроампер). Следовательно, в отличие от обычных транзисторов, выходной ток которых определяется током входного электрода, в полевых транзисторах выходной ток определяется, как и в электронных лампах, напряжением между управляющим электродом (затвором) и стоком. Мощность, необходимая для управления, невелика, так как входной ток очень мал. Входное сопротивление полевого транзистора очень велико и достигает  $10^6$  Ом.

Полевой транзистор характеризуется семейством стоковых характеристик (рис. 11.10)  $I_c = f(U_c) U_a = \text{const}$ . Если напряжение  $U_a$ , приложенное к каналу, равно нулю ( $U_a = 0$ ), то сечение канала максимально. Ток  $I_c$  возрастает при увеличении  $U_c$ , затем наступает

насыщение. Ток насыщения определяется количеством носителей зарядов в канале (концентрацией примесей в полупроводнике). Если напряжение между затвором и стоком становится отрицательным ( $U_3 = -1$  В,  $-2$  В, ...), сечение канала уменьшается и максимальное значение тока, соответствующее режиму насыщения, также становится меньше.

Рабочими участками являются пологие участки характеристик. Максимальное допустимое значение напряжения между стоком и истоком меньше напряжения пробоя  $U_{с.п.}$  ( $U_{с.макс} < U_{с.п.}$ ) (рис. 11.10).

Полевой транзистор характеризуется внутренним сопротивлением

$$R_i = dU_c / dI_c |_{U_3 = \text{const}} \approx \Delta U_c / \Delta I_c |_{U_3 = \text{const}}, \quad (11.6)$$

которое у полевых транзисторов довольно велико и достигает  $10^6$  Ом, а также крутизны

$$S = dI_c / dU_3 |_{U_c = \text{const}} \approx \Delta I_c / \Delta U_3 |_{U_c = \text{const}}, \quad (11.7)$$

характеризующей усилительные свойства транзистора. Крутизна может достигать нескольких миллиампер на вольт (мА/В). Эти параметры можно определить по семейству выходных характеристик (рис. 11.10) в соответствии с уравнениями (11.6) и (11.7).

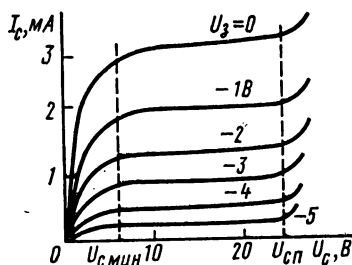


Рис. 11.10. Семейство выходных характеристик полевого транзистора

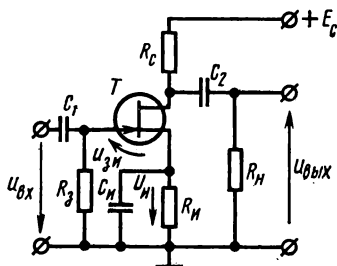


Рис. 11.11. Схема усилителя на полевом транзисторе

Если полевой транзистор построен на основе кристалла с дырочной электропроводностью (канал  $p$ -типа), то напряжение смещения, приложенное к затвору, должно быть положительным. Семейство стоковых характеристик транзистора с каналом  $p$ -типа имеет такой же вид, как на рис. 11.10, но для положительных значений  $U_3$ .

При использовании полевых транзисторов в усилителях переменное напряжение  $u_{вх}$  подается в цепь затвора последовательно с источником смещения  $E_{см}$  ( $|u_{вх}| < |E_{см}|$ ), а в стоковую цепь включается резистор  $R_c$  ( $R_c \ll R_i$ ). Сечение канала периодически изменяется в соответствии с переменным напряжением  $u_{вх}$  и в стоковом токе наряду с постоянной составляющей  $I_{с0}$  появляется переменная составляющая

$$i_c = S u_{вх} \quad (11.8)$$

той же частоты, что и входное напряжение. Переменная составляющая напряжения на зажимах резистора

$$u_c = i_c R_c = S u_{вх} R_c \quad (11.9)$$

образует выходное напряжение  $u_{вых} = -u_c$ . Выбирают такое значение сопротивления  $R_c$ , что величина выходного напряжения намного превышает входное, т. е. имеется усилительный эффект.

Коэффициент усиления по напряжению

$$K_U = \dot{U}_{вых} / \dot{U}_{вх} = -S R_c. \quad (11.10)$$

Знак минус в выражении (11.10) означает, что входное и выходное напряжения находятся в противофазе. На рис. 11.11 приведена схема усилителя на полевом транзисторе  $T$ . Необходимая величина смещения  $U_{з0}$  создается за счет падения напряжения  $U_{и} = R_{и} I_{с0}$  на резисторе  $R_{и}$ , включенном в цепь истока:

$$U_{з0} = -U_{и} = -R_{и} I_{с0}, \quad (11.11)$$

где  $I_{с0}$  — значение стокового тока, соответствующее выбранному напряжению смещения  $U_{з0}$ .

Резистор  $R_3$  служит для подачи в цепь затвора напряжения смещения  $U_{з0}$ . Нагрузочный резистор  $R_{н}$  подключен к выходным зажимам усилителя. Емкостные элементы  $C_1$  и  $C_2$  служат для отделения постоянной составляющей напряжения во входной и выходной цепях.  $C_1$  и  $C_2$  выбирают так, чтобы на частоте усиливаемых сигналов

$$1/(\omega C_1) \ll R_3, \quad 1/(\omega C_2) \ll R_c. \quad (11.12)$$

Так как для переменной составляющей стокового тока резисторы  $R_c$  и  $R_{н}$  включены параллельно, то коэффициент усиления по напряжению будет иметь выражение

$$K = -S \frac{R_c R_{н}}{R_c + R_{н}}. \quad (11.13)$$

Усилители на полевых транзисторах имеют большое преимущество по сравнению с усилителями на биполярных транзисторах, так как они имеют значительно большее входное сопротивление.

В лабораторной работе необходимо снять характеристики полевого транзистора и исследовать усилитель, собранный по схеме рис. 11.11.

### ОПИСАНИЕ ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ ПАНЕЛИ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

В левой части панели (рис. 11.12) укреплен туннельный диод  $D$  с элементами, необходимыми для исследования схемы релаксационного генератора (см. рис. 11.3) на этом диоде. Вольт-амперная характеристика диода снимается с помощью характериографа, описание которого приведено в приложении. Переключение туннельного диода из цепи для снятия характеристик в цепь генератора

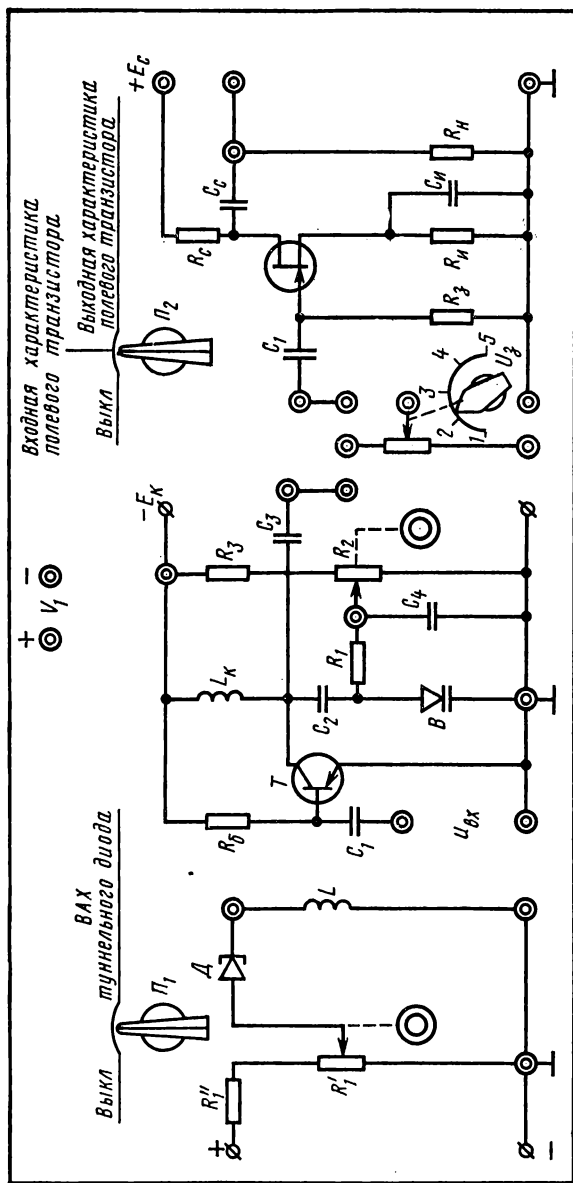


Рис. 11.12. Испытательная панель лабораторного стенда

релаксационных колебаний производится с помощью переключателя  $П_1$ . Схема включения туннельного диода аналогична рис. П.14, а.

Исследование зависимости емкости варикапа от напряжения смещения производится с помощью схемы резонансного усилителя, укрепленного в центре панели.

В правой части панели расположен усилитель на полевом транзисторе. Снятие характеристик транзистора производится с помощью характериографа. Схема включения полевого транзистора аналогична рис. П.12, б. На панели выведена ручка регулировки напряжения затвора  $U_3$  и клеммы для подключения вольтметра, контролирующего величину этого напряжения. В верхней части панели находятся входные клеммы вольтметра  $V_1$ .

### ЗАДАНИЕ

А. Выполняется при подготовке к работе

1. Рассчитать крутизну полевого транзистора с помощью семейства характеристик (рис. 11.10) при  $U_c = -2$  В.

2. Рассчитать коэффициент усиления усилителя (см. рис. 11.11) при  $R_c = 15$  кОм,  $R_n = 51$  кОм.

Б. Выполняется в лаборатории

1. Исследование туннельного диода: а) с помощью характериографа снять вольт-амперную характеристику туннельного диода; б) рассчитать по полученной характеристике дифференциальное сопротивление на падающем участке характеристики; в) включить релаксационный генератор на туннельном диоде и зарисовать с помощью осциллографа напряжение на выходе генератора.

2. Исследование варикапа: а) включить резонансный усилитель на транзисторе  $T$  и подать на его вход напряжение с выхода звукового генератора; б) снять кривую  $C_B = f(U_{обр})$  ( $C_B$  — емкость варикапа,  $U_{обр}$  — напряжение смещения, регулируемое с помощью резистора  $R_2$ ) и рассчитать коэффициент перекрытия по емкости  $q = C_{\max}/C_{\min}$ . Значение емкости  $C_B$  определить по величине резонансной частоты усилителя.

3. Исследование полевого транзистора:

а) с помощью характериографа снять семейство выходных характеристик  $I_c = f(U_c)_{v_3 = \text{const}}$  транзистора при

$U_s = 0, -1, -2, -3, -5, -7$  В; б) рассчитать крутизну  $S$  характеристики транзистора с помощью полученных характеристик и сравнить со значением, полученным при подготовке к выполнению лабораторной работы; в) включить усилитель с резистивно-емкостной связью на полевом транзисторе и снять его амплитудную характеристику; г) по полученным данным рассчитать коэффициент усиления усилителя и сравнить со значением, полученным при подготовке к выполнению лабораторной работы.

### МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

а) Поставить переключатель  $\Pi_1$  в положение «ВАХ туннельного диода» и отключить генератор развертки осциллографа. Срисовав характеристику с экрана осциллографа, необходимо нанести по осям масштабы и рассчитать приближенное значение отрицательного сопротивления. Переключатель  $\Pi_1$  перевести в положение «Выкл.» и подать на осциллограф напряжение с выхода релаксационного генератора на туннельном диоде.

б) Поставить переключатель  $\Pi_2$  в положение «Выходная характеристика полевого транзистора». Включить вольтметр для установки необходимой величины напряжения затвора. На выход усилителя включить вольтметр для измерения переменного напряжения. Для измерения напряжения смещения включить цифровой вольтметр.

в) Переключатель  $\Pi_2$  поставить в положение «Выкл.». На вход усилителя подать напряжение с выхода звукового генератора. На выход усилителя включить вольтметр и осциллограф для контроля формы выходного напряжения. Входное напряжение изменять в пределах  $0,1 \div 8$  В. Определить уровень входного напряжения, при котором форма кривой напряжения на выходе усилителя заметно отличается от синусоидальной.

г) Коэффициент усиления рассчитывать при небольших значениях напряжения на входе ( $U_{вх} = 0,1 \div 0,3$  В).

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключаются особенности туннельных диодов?
2. Дайте качественное объяснение вольт-амперной характеристики туннельных диодов.
3. Назовите основные параметры туннельных диодов.
4. Чем объясняется наличие на вольт-амперной характеристике туннельного диода участка с отрицательным сопротивлением?



6. На чем основано применение туннельного диода в релаксационном генераторе?

6. Что представляет собой варикап?

7. Как зависит величина емкости  $C$  варикапа и сопротивления  $R_{\text{об}}$  от приложенного обратного напряжения?

8. Каковы основные параметры варикапов?

9. Чем регулируется емкость варикапа в схеме резонансного усилителя на транзисторе?

10. Каковы типичные характеристики полевого транзистора?

11. Как изменяется область  $p$ - $n$ -перехода при изменении  $U_g$  и  $U_c$ ?

12. Каким образом происходит управление проходящим через полевой транзистор током?

13. Чем определяется ширина канала для прохождения носителей заряда от истока к стоку?

14. Растет ли сопротивление канала, если напряжение затвора становится более отрицательным?

15. Какие области полевого транзистора называют истоком (стоком)?

16. Какую область полевого транзистора называют затвором?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 12

### ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ И УСТРОЙСТВ

**Цель работы:** изучение принципа действия и характеристик фотоэлементов; ознакомление с устройствами, использующими фотоэлектронные приборы.

#### КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Основные характеристики и параметры фотоэлектронных приборов. Фотоэлектронные приборы преобразуют лучистую энергию (чаще всего в видимой части спектра) в электрическую. К фотоэлектронным приборам относятся электронные, ионные и полупроводниковые фотоэлементы.

Основными характеристиками фотоэлементов являются световая, спектральная, вольт-амперная и частотная.

**Световая характеристика** — зависимость электрического тока  $I$  прибора от светового потока  $\Phi$  при постоянном напряжении на приборе  $U$  и неизменном спектральном составе светового потока. Световая характеристика показывает, насколько эффективно преобразуется лучистая (световая) энергия в электрическую. На основании световой характеристики определяется интегральная чувствительность фотоэлемента. Если световая характеристика нелинейна, чувствительность фотоэлемента определяют как

$$K_{\Phi} = dI/d\Phi. \quad (12.1)$$

**Спектральная характеристика** — зависимость тока  $I$  от длины волны  $\lambda$  излучения при постоянных световом потоке  $\Phi$  и напряжении  $U$ . Спектральная характеристика обычно строится нормирован-

ной по максимуму тока  $I_{\text{макс}}$ , а определяется она в основном свойствами материала, из которого изготовлен фотоэлемент. Снятие спектральных характеристик проводится при монохроматическом световом потоке. Чувствительность к монохроматическому световому потоку называется спектральной чувствительностью.

*Вольт-амперная характеристика* — зависимость тока  $I$  от приложенного к прибору напряжения  $U$  при неизменных световом потоке  $\Phi$  и спектральном составе излучения. Имея семейство вольт-амперных характеристик для различных значений  $\Phi$ , нетрудно построить по ним световую характеристику при  $U = \text{const}$ . Для динамического режима, когда фотоэлемент включен последовательно с нагрузочным резистором, следует провести линию нагрузки, подобно тому, как это делается при выборе рабочей точки транзистора или электронной лампы.

Обычно при  $\Phi = 0$  и приложенном напряжении ток через прибор не равен нулю. Это значение тока «в темноте» называют темновым током  $I_T$ , ему соответствует темновое сопротивление

$$R_T = U/I_T. \quad (12.2)$$

*Частотная характеристика* — зависимость от частоты  $f$  переменной составляющей тока  $I \sim$  фотоэлемента, нормированной по максимальному значению и вызванной колебаниями светового потока  $\Phi$  постоянной амплитуды при фиксированном напряжении  $U$  и неизменном спектральном составе.

Частотная характеристика начинается с 1 при  $f = 0$  и остается на этом уровне при изменении частоты до тех пор, пока не начинают сказываться инерционные процессы в междуэлектродном промежутке прибора.

Электронные фотоэлементы. Электронные вакуумные фотоэлементы содержат анод и катод, помещенные в стеклянную колбу. Катод выполняется в виде слоя светочувствительного материала, нанесенного на внутреннюю поверхность колбы. Чаще других используют кислородно-цезиевый и сурьмяно-цезиевый катоды. Анод изготавливается в виде металлического кольца или сетки. В колбе создается вакуум с остаточным давлением порядка  $10^{-4} \div 10^{-5}$  Па. В электронных фотоэлементах используется явление фотоэлектронной эмиссии (внешний фотоэффект).

Интегральная чувствительность фотоэлемента с кислородно-цезиевым катодом составляет 20—60 мкА/лм, а сурьмяно-цезиевым — до 100 мкА/лм.

Световые характеристики электронного фотоэлемента приведены на рис. 12.1. Они близки к линейным, и лишь для сурьмяно-цезиевых катодов за счет вторичной электронной эмиссии наблюдается небольшое отличие характеристики от линейной. Спектральные характеристики электронных фотоэлементов с разными катодами различны, что необходимо учитывать при их применении.

Рабочими участками вольт-амперных характеристик (рис. 12.2) электронных фотоэлементов является область напряжений более 80 В — участок насыщения, когда практически все эмиттированные электроны достигают анода.

Частотная характеристика электронных фотоэлементов имеет протяженность до сотен мегагерц, что позволяет считать электронные фотоэлементы для многих случаев применения безынерционными.

Высокая линейность световой характеристики и малая инерционность являются важными достоинствами электронных фотоэлементов.

тов. К их недостаткам относятся малая чувствительность и сравнительно большие габариты.

**Ионные фотоэлементы.** Ионные (газонаполненные) фотоэлементы отличаются от электронных тем, что в колбу введен инертный газ (давление  $10 \div 100$  Па). В ионных фотоэлементах происходит самостоятельный темный разряд, первопричиной которого является фотоэлектронная эмиссия.

Интегральная чувствительность ионных фотоэлементов из-за появления вторичных электронов за счет разряда в несколько раз выше чувствительности электронных и составляет  $100 \div 300$  мкА/лм.

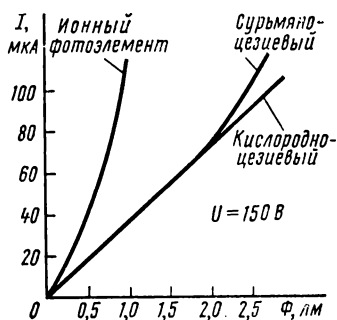


Рис. 12.1. Световые характеристики фотоэлементов

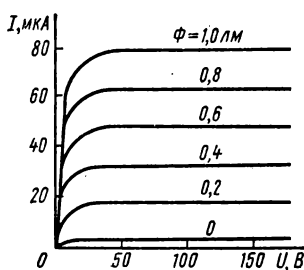


Рис. 12.2. Вольт-амперные характеристики электронного фотоэлемента

Так как катоды у ионных фотоэлементов изготавливаются из тех же материалов, что у электронных фотоэлементов, спектральные характеристики ионных и электронных фотоэлементов практически совпадают. Световая характеристика газонаполненного фотоэлемента (рис. 12.1) идет круче и более криволинейна.

Вольт-амперные характеристики ионного фотоэлемента (рис. 12.3) соответствуют вольт-амперной характеристике ионного прибора несамостоятельного темного разряда.

Процесс установления газового разряда (особенно деионизация) происходит сравнительно медленно, поэтому частотная характеристика ионных фотоэлементов не превышает 10 кГц.

По сравнению с электронными фотоэлементами достоинством ионных фотоэлементов является высокая чувствительность, а недостатки — большая инерционность и нелинейность световой характеристики.

**Полупроводниковые фотоэлементы.** В полупроводниковых фотоэлементах используется явление внутреннего фотоэффекта — изменение электрической проводимости или появление э. д. с. при воздействии светового излучения на полупроводниковое вещество. К полупроводниковым фотоэлементам относятся фоторезисторы, фотогальванические (вентильные) элементы, фотодиоды и фототранзисторы. Фоторезисторы изготавливаются из одного слоя полупроводника, а фотогальванические элементы, фотодиоды и фототранзисторы создаются на базе  $p$ - $n$ -переходов.

**Фоторезистор** является прибором, построенным из полупроводника одной проводимости. При попадании на полупроводник света в нем появляется значительное количество подвижных носителей зарядов (электронов и дырок). Появление свободных носителей зарядов увеличивает электрическую проводимость вещества, поэтому электрическое сопротивление резистора, изготовленного из полупроводникового вещества, с увеличением освещенности падает.

Фоторезисторы изготавливаются из сернистого свинца (фоторезисторы серии ФСА), селенида кадмия (фоторезисторы серии ФСД), сернистого кадмия (фоторезисторы серии ФСК) и др.

Световая характеристика фоторезисторов нелинейна (рис. 12.4). Чувствительность фоторезистора 2500–5000 мкА/лм.

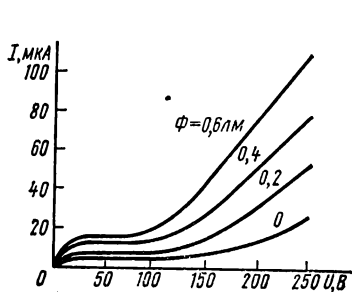


Рис. 12.3. Вольт-амперные характеристики ионного фотозлемента

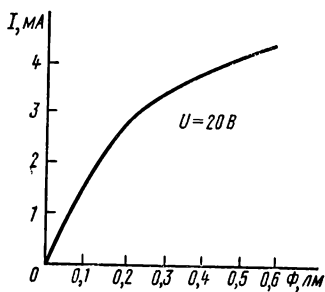


Рис. 12.4. Световая характеристика фоторезистора

Спектральные характеристики фоторезисторов зависят от материала, из которого изготовлен фоторезистор. Наибольший диапазон длин волн охватывают резисторы типа ФСА.

Вольт-амперные характеристики фоторезисторов — прямые линии, проходящие через начало координат. Величина тока фоторезисторов не зависит от его направления, поэтому они могут с успехом использоваться при питании переменным напряжением, что невозможно при использовании других фотозлементах. Наклон характеристики при  $\Phi=0$  определяет темновое сопротивление  $R_T$ , величины которого приводятся обычно в справочниках.

Фоторезисторы имеют большую инерционность, поэтому их частотные характеристики отличаются очень малой верхней рабочей частотой (около 1 кГц).

Достоинствами фоторезисторов являются большая чувствительность, простота конструкции и использования, что определяет их применение для регистрации наличия светового потока.

К существенным недостаткам фоторезисторов относятся нелинейность световой характеристики, большая инерционность, сильная температурная зависимость.

**Фотодиоды** — это полупроводниковые диоды с одним *p-n*-переходом. Их изготавливают на основе германия или кремния и подключают к источнику напряжения в обратном направлении. Такой режим работы называется фотопреобразовательным.

Фотодиод фактически включается как фоторезистор, но световое излучение сильнее влияет на  $p-n$ -переход, поэтому чувствительность фотодиодов значительно выше — до 20 мА/лм. Световая характеристика фотодиода близка к линейной. Спектральные характеристики определяются веществом, из которого изготовлен фотодиод.

Фотодиод может быть использован в фотопреобразовательном и генераторном режимах.

Вольт-амперные характеристики фотодиодов приведены на рис. 12.5. Их рабочими участками являются области отрицательных значений напряжения.

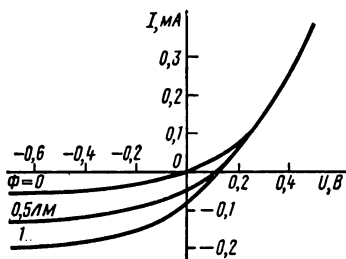


Рис. 12.5. Вольт-амперные характеристики фотодиода

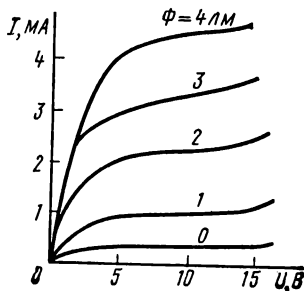


Рис. 12.6. Вольт-амперные (коллекторные) характеристики фототранзистора

Использование различных режимов работы (прямой и обратный) приводит к резкому изменению частотных свойств полупроводниковых фотоэлементов. Так, фотодиоды хорошо работают на частотах 100 кГц и более, что значительно превышает верхние рабочие частоты многих фотоэлементов.

Достоинства фотодиодов — высокая чувствительность, хорошие частотные свойства, малые габариты. Недостаток — сильная температурная зависимость.

Фототранзисторы имеют два  $p-n$ -перехода и могут быть типа  $p-n-p$  и  $n-p-n$ . При работе фототранзистора на область базы направляется световой поток и  $p-n$ -переход эмиттер — база работает, как  $p-n$ -переход фотодиода.

Возникающая при освещении фото-э. д. с. приводит к увеличению прямого смещения на эмиттерном переходе, а появляющиеся из-за этого дополнительные носители зарядов (дырки) приводят к возрастанию тока коллектора в  $\beta + 1$  раз по сравнению с фототоком. Благодаря этому интегральная чувствительность фототранзистора достигает 0,5 А/лм.

Световая и спектральная характеристики фототранзисторов подобны аналогичным характеристикам фотодиодов. Вольт-амперные характеристики фототранзисторов (рис. 12.6) аналогичны коллекторным характеристикам обычного транзистора, но параметром у этих характеристик является не ток базы, а световой поток.

Вывод базы у фототранзистора, если он имеется, может быть дополнительно использован для управления выходным током

электрическими сигналами или для создания цепи температурной стабилизации. Верхняя рабочая частота фототранзисторов достигает величины около  $10^6$  Гц.

Достоинствами фототранзисторов являются очень большая чувствительность и возможность двойного управления. Недостатки фототранзисторов — большой уровень шумов и температурная неустойчивость.

### ОПИСАНИЕ ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ ПАНЕЛИ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

На испытательной панели лабораторной установки закреплены в затемняющем кожухе исследуемые фотоэлементы: электронный типа СЦВ-4, ионный типа ЦГ-3, фоторезистор ФСК-2, фотодиод ФД-1 и фототранзистор типа ФТ-1 (рис. 12.7).

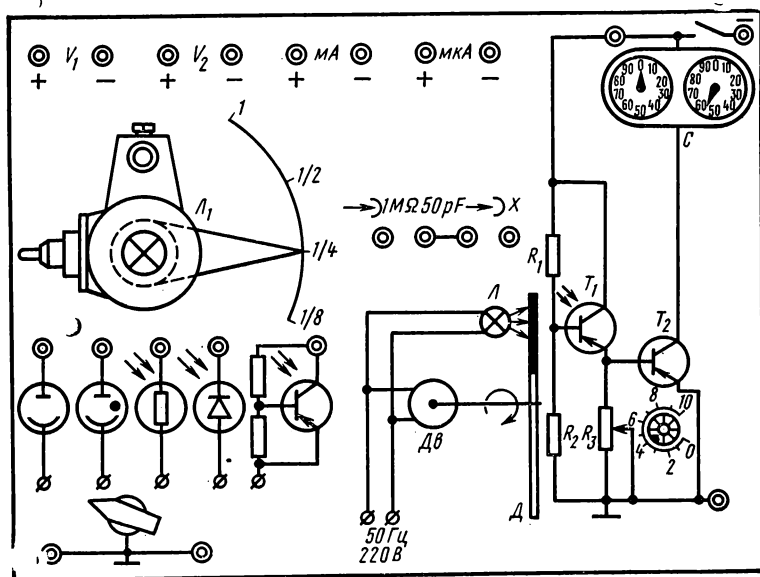


Рис. 12.7. Испытательная панель лабораторного стенда

Фотоэлементы освещаются малогабаритной лампой накаливания  $L_1$ . Световой поток формируется объективом. Применение объектива дает возможность сконцентрировать световой поток на фотоэлементе. Регулирование величины светового потока производится с помощью ди-

афрагмы объектива, ручка регулировки которой выведена на внешнюю сторону панели. Диафрагма позволяет получать световой поток максимальной величины  $\Phi_m$  и дробные части от него:  $\Phi_m/2$ ,  $\Phi_m/4$  и  $\Phi_m/8$ . Поскольку все фотоэлементы имеют выводы различной конструкции, они закреплены неподвижно, а выбор объекта исследования производится поворотом зеркала, направляющего световой поток на соответствующий фотоэлемент. Поворот зеркала сопряжен с переключателем выводов фотоэлементов.

Для изменения напряжения на фотоэлементе применяется регулируемый делитель напряжения в виде потенциометра с ограничивающим резистором.

Измерение фототока производится микроамперметром (электронный и ионный фотоэлементы и фотодиод) или миллиамперметром (фоторезистор и фототранзистор). Измерение напряжения источника питания производится вольтметром, а напряжение на фотоэлементах — электронным вольтметром. Большая часть работы выполняется с помощью характериографа.

Устройство для бесконтактного счета световых импульсов используется в работе для определения числа оборотов двигателя. Аналогичные устройства могут использоваться и для других целей, например для счета деталей на конвейере и т. п.

Упрощенная электрическая схема устройства для счета числа световых импульсов приведена на рис. 12.7. Осветительная лампочка  $L$  создает световой поток, освещающий фототранзистор  $T_1$ . Световой поток периодически прерывается диском  $D$  с окошком. Диск насажен на ось двигателя  $Dв$ , число оборотов которого необходимо измерить.

Устройство для счета световых импульсов содержит два усилительных каскада на транзисторах ( $T_1$  и  $T_2$ ) и счетчик импульсов  $C$  типа СБ-1М емкостью  $10^4$  единиц. В первом каскаде использован фототранзистор типа ФТ-1. Первый каскад преобразует световые импульсы в электрические сигналы. Делитель из резисторов  $R_1$  и  $R_2$  обеспечивает начальную установку потенциала базы фототранзистора  $T_1$ . Нагрузкой первого каскада являются резистор  $R_3$  и участок база — эмиттер второго каскада. Второй каскад, собранный на транзисторе  $T_2$  типа П214 (П215), является усилителем мощности и собран по схеме с общим эмиттером. В коллекторную цепь транзисто-

ра  $T_2$  включен счетчик  $C$ . Связь между первым и вторым каскадами — непосредственная.

Большую часть времени база фототранзистора  $T_1$  затемнена диском, поэтому токи транзисторов  $T_1$  и  $T_2$  малы и ток через обмотку реле счетчика  $C$  также мал.

При освещении фототранзистора  $T_1$  резко увеличиваются его коллекторный и эмиттерный токи, что приводит к увеличению тока базы и коллектора транзистора  $T_2$ . Когда коллекторный ток транзистора достигнет значения тока срабатывания счетчика  $C$ , реле счетчика сработает и передвинет указательную стрелку счетчика на одну единицу. Число срабатываний счетчика определяется числом световых импульсов, которое в свою очередь прямо пропорционально числу оборотов двигателя  $Dв$ . В работе использован двигатель типа 2АСМ-50. Включив устройство на известное время и сосчитав число импульсов за это время, нетрудно определить скорость вращения двигателя.

### ЗАДАНИЕ

А. Выполняется при подготовке к работе

1. Изучить основные характеристики фотоэлектронных приборов.

2. Изобразить схемы включения исследуемых фотоэлектронных приборов для снятия их характеристик и указать диапазоны изменения токов и напряжений при снятии вольт-амперных характеристик.

Б. Выполняется в лаборатории

1. Получить с использованием характериографа и измерительной аппаратуры вольт-амперные и световые характеристики электронного фотоэлемента типа СЦВ-4, ионного фотоэлемента типа ЦГ-3, фоторезистора типа ФСК-2, фотодиода типа ФД-1 и фототранзистора типа ФТ-1.

2. Определить по снятым характеристикам интегральную чувствительность, темновой ток и темновое сопротивление каждого фотоэлектронного прибора.

3. Изучить работу устройства для счета световых импульсов и определить скорость вращения двигателя. Проверить влияние питающего напряжения на работу устройства счета.



## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

а) Работа в лаборатории начинается с выбора рабочих режимов характеристики по значениям, полученным на основании паспортных данных фотоэлектронных приборов. Значения токов и напряжений в отдельных точках характеристик уточняются дополнительно по измерительным приборам. Это необходимо для градуировки характеристик и для определения интегральной чувствительности. Параметром у вольт-амперных характеристик является величина светового потока, устанавливаемая путем регулировки диафрагмы объектива. На осциллограммах наносятся оси и нормированные значения светового потока  $\Phi/\Phi_{\text{макс}}$ . На основании измерений в контрольных точках производится градуировка по осям координат. При этом, где возможно, контрольные величины следует устанавливать равными целым числам, удобным для последующей градуировки (например, 10, 20, 50, 100 В и т. п.).

По снятым вольт-амперным характеристикам строят световые характеристики.

б) Интегральная чувствительность может быть определена как по световым характеристикам, так и путем измерения при снятии контрольных точек. Темновой ток измеряется микроамперметром, а темновое сопротивление рассчитывается по формуле (12.2). Значения интегральной чувствительности сводятся в общую таблицу, позволяющую произвести сопоставление различных фотоэлектронных приборов.

в) Изучение устройства для счета световых импульсов состоит в ознакомлении с его схемой и конструктивными особенностями и проверки его работы при медленном вращении диска от руки. Устанавливается нуль счетчика, включается двигатель и в определенный момент времени включается устройство счета. Устройство должно находиться в рабочем состоянии 1 мин, после чего считывается показание счетчика, численно равное числу оборотов в минуту.

Изменяя напряжение питания, определяют величину напряжения, при которой счетчик перестает устойчиво срабатывать при вращении диска от руки или с помощью двигателя.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Укажите основные характеристики и параметры фотоэлементов.
2. Что определяет спектральную характеристику фотоэлемента?
3. Сравните электронные и ионные фотоэлементы между собой.
4. Какой фотоэлемент имеет наивысшую чувствительность?
5. Какие причины вызывают возникновение темнового тока?
6. Какой фотоэлемент обеспечивает наибольшую линейность световой характеристики?
7. Сравните преимущества и недостатки электронных и полупроводниковых фотоэлементов.
8. Будет ли изменяться фототок, если вместо дневного света осветить фотоэлемент через красный или зеленый светофильтр?
9. Накладываются ли ограничения на величину приложенного к фотоэлементу напряжения?
10. Какой фотоэлемент допускает изменение полярности приложенного напряжения?
11. Какие режимы работы фотодиода возможны?
12. Укажите назначение базы в фототранзисторе.
13. Какие фотоэлектронные приборы имеют наименьшие размеры?
14. Можно ли использовать в устройстве для счета световых импульсов электронный фотоэлемент?
15. Какие фотоэлементы обеспечивают большую точность измерения световых потоков: полупроводниковые или электронные?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 13

### ИССЛЕДОВАНИЕ ГИБРИДНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

**Цель работы:** ознакомление с характеристиками гибридных интегральных микросхем и их применением в усилителях низкой частоты.

#### КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Применение электронных устройств для решения все более сложных технических задач непрерывно приводит к их усложнению. Если в 1950 г. число элементов активных (ламп, транзисторов, диодов) и пассивных (резисторов, конденсаторов, дросселей, транзисторов) редко превосходило 10 000 даже в самых сложных устройствах, то в 1970 г. применялись электронные устройства с числом элементов до  $10^6$  и даже  $10^7$ .

Такой рост сложности электронных устройств требует миниатюризации элементов этих устройств.

Увеличение сложности электронных устройств, увеличение числа элементов в них приводят к возрастанию габаритов, увеличению потребляемой энергии и повышению стоимости. Поэтому применение функционально сложных элементов вместо таких простых, как транзистор, диод, резистор, конденсатор и т. д., должно также обеспе-

чить существенное снижение габаритов всего устройства и его составных частей, потребляемой энергии и стоимости.

Создание очень сложных устройств стало возможным на основе внедрения в электронную технику принципов элементной интеграции — объединения в одном сложном миниатюрном элементе многих простейших элементов (диодов, транзисторов, резисторов и т. п.). Полученный в результате такого объединения сложный микроэлемент называют интегральной микросхемой.

Таким образом, *интегральные микросхемы* — это микроэлектронные изделия, состоящие из активных элементов (транзисторов), пассивных элементов (резисторов, конденсаторов, дросселей и др.), которые изготавливаются в едином технологическом процессе, электрически соединены между собой и заключены в общий корпус.

По технологии изготовления интегральные микросхемы делятся на *полупроводниковые*, в которых все элементы формируются в полупроводниковом материале, и *гибридные*, которые выполняются в виде пленок, наносимых на поверхность диэлектрического материала, и навесных бескорпусных элементов (транзисторов, диодов, конденсаторов и т. д.), прикрепленных к основанию.

Как полупроводниковые, так и гибридные микросхемы подразделяются на *схемы малой* (до 30 элементов), *средней* (до 150 элементов) и *большой* (более 150 элементов) интеграции, так называемые большие интегральные схемы (БИС).

Гибридные интегральные микросхемы (ГИМ) включают в себя основные конструктивные элементы:

- изоляционное основание из стекла, керамики или другого материала, на поверхности которого расположены пленочные проводники, контактные площадки, резисторы и конденсаторы (как правило, небольшой емкости);

- навесные бескорпусные активные элементы (транзисторы и диоды);

- навесные пассивные элементы в специальном миниатюрном исполнении, которые не могут быть выполнены в виде пленок, конденсаторы большой емкости, трансформаторы, дроссели;

- пластмассовый или металлический корпус, который служит для герметизации ГИМ и крепления выводных лепестков.

На рис. 13.1 представлена конфигурация пленочных резисторов с малым рис. 13.1, а и большим рис. 13.1, б сопротивлениями. Такие резисторы в виде тонкой пленки чистого хрома, никрома или тантала наносятся непосредственно на изоляционной основе. Таким способом удается получать резисторы с сопротивлением от тысячных долей ома до десятков килоом. Для получения более высокоомных резисторов (сопротивлением до десятков мегом) применяются металлодиэлектрические смеси, например состоящие из хрома и монооксида кремния. Средний объем пленочных резисторов составляет  $1\div 2\text{ мм}^3$ .

В качестве диэлектрика в конденсаторах применяются пленки из силиката алюминия, титаната бария, двуоксида титана, окиси бериллия, кремния и др. Эти пленки обладают хорошей электрической прочностью и высокой диэлектрической проницаемостью. Конденсаторы такого типа могут иметь емкость от десятых долей до десятков тысяч пикофард. Площадь конденсаторов — от  $10^{-3}$  до  $1\text{ см}^2$ .

Проводники в гибридной интегральной микросхеме, обеспечивающие необходимое соединение элементов между собой и подклю-

ние к выводным зажимам, обычно выполняются в виде тонкой пленки золота, меди или алюминия с подслоем никеля, хрома или титана. Подслой обеспечивает высокую адгезию к изоляционному основанию, а слой золота, меди или алюминия — высокую электрическую проводимость.

Для изготовления тонкопленочных элементов (проводников, резисторов, конденсаторов) широко применяется метод термического напыления в вакууме. Для придания пленкам заданной конфигурации наибольшее распространение получил метод свободной маски. Метод основан на экранировании подложки с помощью специальных съемных трафаретов, кроме тех участков, на которые наносятся

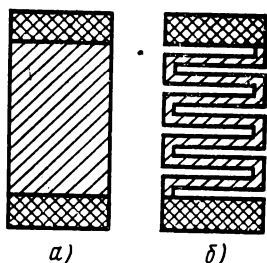


Рис. 13.1. Пленочные резисторы с малым сопротивлением (а) и с большим сопротивлением (б)

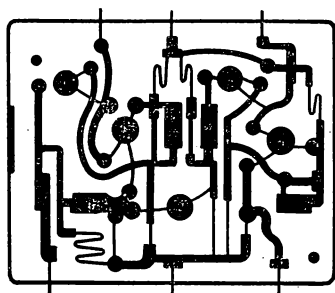


Рис. 13.2. Тонкопленочная гибридная интегральная микросхема (без корпуса) размерами  $15 \times 10 \text{ мм}^2$

элементы данного слоя. Для того чтобы рисунок нанесенной пленки имел четкий край и совпадал с рисунком маски, маски выполняются из тонкой металлической фольги и плотно прижимают к подложке с помощью специальных маскодержателей. Такая технология обеспечивает нанесение тонких пленок толщиной от 1 мкм, шириной от 100—200 мкм, минимальным расстоянием между элементами 100—200 мкм, с отклонением от размеров маски на  $\pm 5 \div 7 \text{ мкм}$ .

Навесные активные элементы с гибкими выводами из золотой проволоки диаметром  $30 \div 50 \text{ мкм}$  присоединяются к пленочной микросхеме пайкой или сваркой. В последнее время широкое распространение получили активные элементы с жесткими «шариковыми» выводами, при помощи которых осуществляются жесткое крепление и электрическое подсоединение активных элементов.

Плотность пассивных и активных элементов при их многослойном расположении в гибридной интегральной микросхеме, выполненной по тонкопленочной технологии, может достигать до 300÷500 элементов на один квадратный сантиметр. Внешний вид интегральной микросхемы без корпуса показан на рис. 13.2. Собранный гибридная интегральная микросхема помещается в жесткий металлический или пластмассовый корпус, предназначенный для повышения механической прочности и герметизации микросхемы.

Надежность гибридных интегральных микросхем весьма велика, среднее время безотказной работы при испытаниях в наиболее тяжелых режимах может достигать  $10^6$  ч.

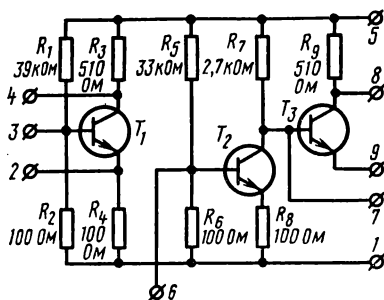
Электронные устройства, выполненные с применением гибридных интегральных микросхем, могут иметь плотность монтажа до  $50 \div 100$  элементов (активных и пассивных) на кубический сантиметр. При такой плотности монтажа объем устройства, содержащего  $10^7$  пассивных и активных элементов, может составлять всего  $0,1 - 0,5 \text{ м}^3$ , а среднее время безотказной работы такого устройства может достигать  $10^3 \div 10^4$  ч.

В настоящей работе исследуется гибридная интегральная микросхема К2УБ241 серии К224, предназначенной для работы в аппаратуре широкого применения. Все микросхемы серии К224 изготавливаются в прямоугольном металлополимерном корпусе и имеют массу не более 3 г.

Условное обозначение интегральной микросхемы состоит из пяти элементов:

Первый элемент — буква «К», указывающая, что

Рис. 13.3. Принципиальная электрическая схема гибридной микросхемы К2УБ241



интегральная микросхема предназначена для аппаратуры широкого применения.

Второй элемент — цифра, указывающая на технологическую разновидность интегральной микросхемы: 1 — полупроводниковые и совмещенные микросхемы, 2 — гибридные микросхемы.

Третий элемент — двухбуквенное обозначение, указывающее на функциональное назначение микросхемы: УС — усилитель синусоидального напряжения, УТ — усилитель постоянного тока, УБ — видеоусилитель (широкополосный), ГС — генератор синусоидальных колебаний, КТ — электронный транзисторный ключ.

Четвертый элемент — двузначное число, указывающее на номер серии, например 24 для микросхемы К2УБ241.

Пятый элемент — число, указывающее номер разработки микросхемы из данной серии.

Все микросхемы серии К224 выполнены по толстопленочной технологии с использованием микротранзисторов типа КТТ-5 (*n-p-n*).

Микротранзисторы КТТ-5 имеют следующие параметры:

Входное сопротивление $h_{11}$ . . . . .	1000 Ом
Коэффициент усиления по току $h_{21}$ . . . . .	$30 \div 90$
Обратный ток коллектора $I_{к0}$ . . . . .	5 мкА
Коэффициент усиления по току на частоте 100 МГц . . . . .	30
Предельно допустимое напряжение между коллектором и эмиттером $U_{кэ доп}$ . . . . .	10 В
Предельный допустимый ток коллектора $I_{к доп}$ . . . . .	20 мА

В микросхемах используются конденсаторы типа К-10-9 шести номиналов: 82, 430, 510, 4700 пФ и 0,01 и 0,033 мкФ.

Монтаж микросхем выполнен на керамическом основании путем нанесения проводников и резисторов с последующим монтажом транзисторов и конденсаторов.

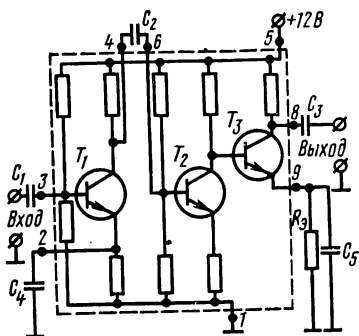


Рис. 13.4. Схема усилителя на микросхеме К2УБ241

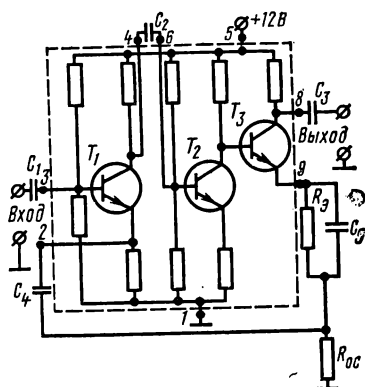


Рис. 13.5. Усилитель с обратной связью на микросхеме К2УБ241

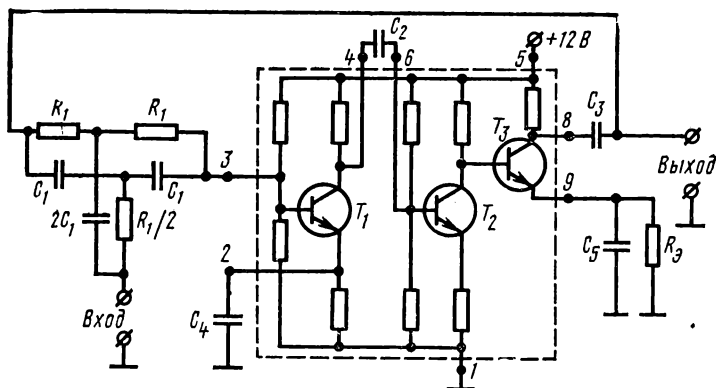


Рис. 13.6. Избирательный усилитель на микросхеме К2УБ241

Принципиальная электрическая схема гибридной интегральной микросхемы К2УБ241 приведена на рис. 13.3. Как видно из рисунка, микросхема представляет собой трехкаскадный усилитель. Первый каскад выполнен на транзисторе  $T_1$  по схеме с общим эмиттером, с температурной стабилизацией. Второй и третий каскады выполнены на транзисторах  $T_2$  и  $T_3$  и имеют гальваническую связь между каскадами. Во втором каскаде температурная стабилизация осуществ-

является резистором  $R_8$ , в третьем каскаде резистор  $R_9$  для температурной стабилизации подключается к выводу 9. Электрическая схема усилителя на микросхеме К2УБ241 показана на рис. 13.4. Как видно из рисунка, в усилитель включен ряд конденсаторов большой емкости, которые из-за больших габаритов не могут быть помещены в корпусе микросхемы. Конденсатор  $C_1$  служит для разделения постоянных составляющих напряжений на входе усилителя;  $C_2$  — конденсатор связи между каскадами,  $C_3$  — конденсатор связи с нагрузочным резистором, конденсаторы  $C_4$  и  $C_5$  являются конденсаторами фильтров в цепях температурной стабилизации. Резистор  $R_8$ , включенный в цепь эмиттера  $T_3$ , служит для температурной стабилизации третьего каскада.



Рис. 13.7. Амплитудно-частотная характеристика избирательного усилителя

На рис. 13.5 показана схема усилителя с последовательной отрицательной обратной связью. Здесь напряжение обратной связи снимается с резистора  $R_{00}$  и через конденсатор  $C_4$  подается в цепь эмиттера  $T_1$ . Такая обратная связь уменьшает коэффициент усиления усилителя, но увеличивает

входное сопротивление усилителя и стабилизирует его коэффициент усиления. Микросхема К2УБ241 позволяет создать низкочастотный избирательный усилитель с двойным Т-образным мостом в цепи отрицательной обратной связи. Схема такого усилителя показана на рис. 13.6. Двойной Т-образный мост ( $R_1, R_1, R_1/2; C_1, C_1, 2C_1$ ) в цепи обратной связи соединяет выход усилителя с его входом.

Частотные характеристики избирательного усилителя с мостом в цепи отрицательной обратной связи и без него показаны на рис. 13.7.

## ОПИСАНИЕ ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ ПАНЕЛИ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

На испытательной панели, показанной на рис. 13.8, расположены: усилитель 1 на микросхеме К2УБ241, усилитель 2 на микросхеме К1УТ401Б, модулятор и демодулятор на микросхемах К1КТ011А (микросхемы К1УТ401Б и К1КТ011А в настоящей работе не используются), потенциометр  $P_1$ , делители  $D_1$  и  $D_2$ , эквиваленты нагрузочных устройств  $H_1, H_2, H_3$  и  $H_4$ , двойной Т-образный мост 2ТМ и мост Вина МВ. К микросхемам подведены питающие напряжения. Ручки потенциометров  $P_1, D_2$  и  $H_1$  выведены на верхнюю часть панели, потенциометры  $D_2$  и  $H_1$  отградуированы в килоомах и омах.

На верхнюю часть панели выведены зажимы вольтметров постоянного напряжения  $V_1$  и  $V_2$  и источники пе-

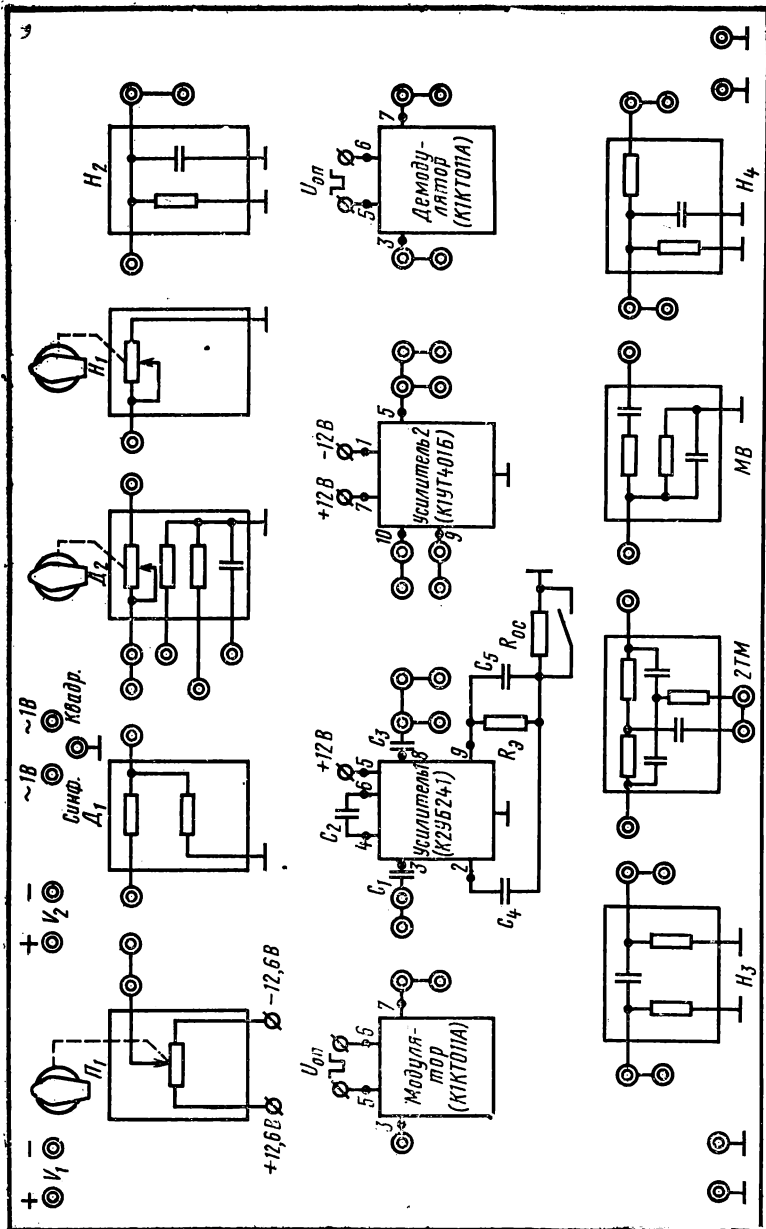


Рис. 13.8. Испытательная панель лабораторного стенда



ременного напряжения величиной 1 В, частотой 50 Гц синфазного и квадратурного (сдвинутого на угол  $\pm 90^\circ$  по отношению к напряжению питания модулятора и демодулятора).

Монтаж усилительных устройств в соответствии с заданием ведется гибкими проводами со штекерами.

На панели все общие выводы, отмеченные знаком « $\perp$ », соединены с корпусом, поэтому соединения между блоками осуществляется одним проводом. Вторым проводом служит общий заземляющий провод. Исключение составляет лишь подключение вольтметров, звукового генератора и осциллографа, размещенных на стенде. Подключение последних осуществляется двумя проводами, при этом общий провод подключается к выводам, расположенным в правом и левом нижних углах испытательной панели.

### ЗАДАНИЕ

А. Выполняется при подготовке к работе

Рассчитать  $f_H$  усилителя на микросхеме К2УБ241 при  $C_1=5$  мкФ,  $C_2=2$  мкФ и  $C_3=5$  мкФ,  $R_H=2$  кОм.

Б. Выполняется в лаборатории

1. Собрать усилитель с резистивно-емкостной связью на микросхеме К2УБ241. Снять амплитудную характеристику усилителя на частоте 1 кГц. Определить  $U_{\text{вых.доп}}$ , при котором искажения формы напряжения незначительны. Снять осциллограммы выходного напряжения усилителя.

2. Измерить входное сопротивление  $R_{\text{вх}}$  и коэффициент усиления  $K_{U_{\text{х.х}}}$  усилителя на частоте 1 кГц.

3. Определить полосу пропускания усилителя.

4. Собрать усилитель с отрицательной обратной связью. При  $\beta=0,01$  определить коэффициент усиления такого усилителя и входное сопротивление усилителя  $R_{\text{вх.ос}}$  на частоте 1 кГц.

5. Собрать избирательный усилитель на микросхеме К2УБ241. Снять частотную характеристику с включенной и отключенной цепью обратной связи. Определить частоту квазирезонанса и коэффициент усиления на этой частоте с включенной и отключенной цепью обратной связи. Определить полосу пропускания избирательного усилителя.

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

а) Нижняя граничная частота усилителя  $f_n$  определяется из равенства

$$\frac{|K(f_n)|}{K_0} = \frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0,707, \quad (13.1)$$

где  $|K(f_n)|$  — коэффициент усиления на частоте  $f_n$ ;  $K_0$  — коэффициент усиления на средних частотах (1 кГц). Для исследуемого усилителя частотная зависимость коэффициента усиления в области низких частот

$$\begin{aligned} \frac{|K(f_n)|}{K_0} &= \\ &= \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega_n \tau_{n1}}\right)^2} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega_n \tau_{n2}}\right)^2} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega_n \tau_{n3}}\right)^2}}. \end{aligned} \quad (13.2)$$

Здесь  $\tau_n$  — постоянная времени цепи разделительного конденсатора:

$$\tau_{n1} = C_1 h_{11}; \quad \tau_{n2} = C_2 (R_3 + h_{11}); \quad \tau_{n3} = C_3 (R_9 + R_n).$$

Решение уравнения (13.1) с учетом выражения (13.2) осуществляется графическим методом: строится частотная характеристика усилителя в области низких частот и при  $\frac{|K(f_n)|}{K_0} = 0,707$  определяется нижняя граничная частота.

б) Исследование усилителя с резистивно-емкостной связью производится с помощью установки, схема которой приведена на рис. 13.9.

В соответствии с этой схемой напряжение от звукового генератора ЗГ подается на вход усилителя через делители  $D_1$  и  $D_2$ . Напряжение на входе усилителя определяется по вольтметру звукового генератора с учетом коэффициента деления делителя  $D_1$  ( $D_2$  находится в крайнем правом положении,  $R_{д2} = 0$ ).

Выходное напряжение усилителя измеряется вольтметром  $V_3$ . При снятии амплитудной характеристики к

выходу усилителя подключается нагрузочный резистор  $H_2$ . Амплитудная характеристика усилителя снимается при изменении входного напряжения от 1 до 50 мВ. Выходное напряжение осциллографируется при  $U_{вх}=1$  и 50 мВ.

в) Для определения входного сопротивления усилителя  $R_{вх}$  надо увеличить сопротивление делителя  $D_2$  ( $R_{д2}$ ). При равенстве сопротивлений  $R_{д2}=R_{вх}$  выходное напря-

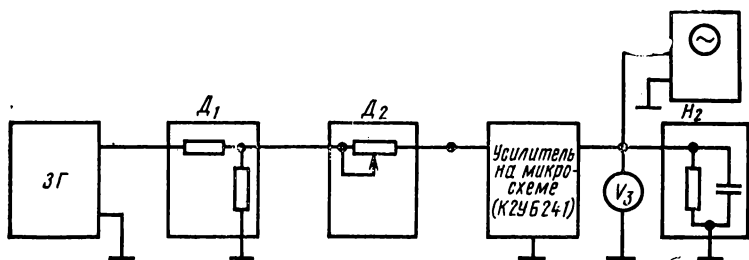


Рис. 13.9. Схема для исследования усилителей

жение уменьшается вдвое. Коэффициент усиления  $K_{U_{x,x}}$  определяется при отключенном нагрузочном резисторе  $H_2$  и при  $R_{д2}=0$ .

Входное сопротивление определяется при работе усилителя на линейном участке амплитудной характеристики.

г) Определение нижней  $f_H$  и верхней  $f_H$  граничных частот, характеризующих полосу пропускания усилителя, производится при снижении выходного напряжения до 0,707 от величины выходного напряжения, измеряемой на частоте 1 кГц. При определении полосы пропускания усилителя величина входного напряжения поддерживается постоянной.

д) Измерение  $K_{ос}$  и  $R_{вх,ос}$  усилителя с отрицательной обратной связью необходимо производить на линейном участке амплитудной характеристики, т. е. при отсутствии искажений выходного напряжения ( $U_{вых}=1 \div 3$  В).

е) Исследование избирательного усилителя на микросхеме К2УБ241 производится по схеме рис. 13.6. Частотная характеристика избирательного усилителя снимается при  $U_{вх}=50$  мВ в диапазоне частот от 100 Гц до 10 кГц (10÷12 точек). Максимум выходного напряжения дости-

гается на частоте квазирезонанса. На границах полосы пропускания ( $f_n$  и  $f_v$ ) выходное напряжение снижается до 0,707 от максимального. Полоса пропускания избирательного усилителя определяется по формуле

$$\Delta f = \frac{f_v - f_n}{2}.$$

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему создание сложных электронных устройств возможно лишь при повышении надежности элементов?
2. Чем определяется потребность в миниатюризации электронных устройств?
3. Из каких основных элементов состоит гибридная интегральная микросхема?
4. Какую конфигурацию имеют пленочные резисторы?
5. Из какого материала изготавливаются резисторы?
6. Каковы габариты пленочных резисторов и конденсаторов?
7. Как крепятся навесные транзисторы и конденсаторы?
8. Какова технология нанесения тонких пленок?
9. Для чего микросхема помещается в корпус?
10. Сколько усилительных каскадов в микросхеме К2УБ241?
11. Для чего в усилитель на микросхеме К2УБ241 введены конденсаторы  $C_1$ ,  $C_2$  и  $C_3$ ?
12. Для чего включены конденсаторы  $C_4$  и  $C_5$ ?
13. Как отрицательная обратная связь изменяет параметры усилителя?
14. Как измерить  $R_{вх}$  усилителя?
15. Как определить  $f_n$  и  $f_v$  усилителя?
16. Как подключение двойного Т-образного моста в цепи отрицательной обратной связи изменяет характеристики усилителя?
17. Как определяется полоса пропускания избирательного усилителя?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 14

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

**Цель работы:** ознакомление с характеристиками полупроводниковых интегральных микросхем и их применением в усилителях, преобразователях и генераторах.

### КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Дальнейший процесс миниатюризации электронных устройств, повышения их сложности и надежности осуществляется при применении *полупроводниковых интегральных микросхем*.

В отличие от гибридных интегральных микросхем, которые состоят из двух типов элементов: тонкопленочных резисторов, конденсаторов, соединительных проводов и навесных транзисторов, дросселей и конденсаторов большой емкости, — полупроводниковые интегральные микросхемы состоят обычно из отдельных областей

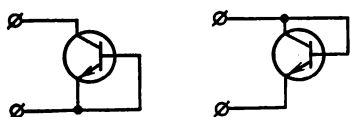


Рис. 14.1. Транзистор в диодном включении

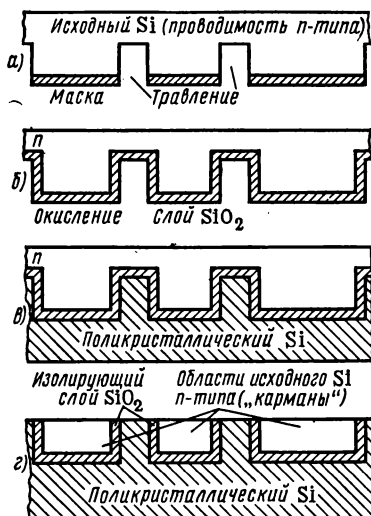


Рис. 14.2. Образование изолированных участков  $n$ -кремния с помощью диэлектрика — окисла кремния

Для получения больших сопротивлений иногда используются входные сопротивления эмиттерных повторителей, величина которых может достигать десятков и даже сотен килоом. Температурная стабильность таких сопротивлений удовлетворительна во всем рабочем диапазоне. Отклонение величины сопротивления от номинального примерно  $\pm 20\%$ .

Дроссели в полупроводниковых интегральных микросхемах создавать очень трудно, поэтому в большинстве случаев используются устройства, в которых отсутствуют индуктивные элементы.

кристалла, каждая из которых выполняет функцию транзистора, диода, резистора или конденсатора.

Транзисторы в таких микросхемах представляют собой трехслойные структуры с двумя  $p$ - $n$ -переходами, обычно  $p$ - $n$ - $p$ -типа. Диоды представляют собой либо двухслойные структуры с одним  $p$ - $n$ -переходом, либо в качестве диодов используются транзисторы в диодном включении (рис. 14.1). Роль конденсаторов в полупроводниковых интегральных схемах выполняют  $p$ - $n$ -переходы, запертые обратным постоянным напряжением. Максимальная практически достижимая величина емкости таких конденсаторов лежит в пределах  $100 \div 200$  пФ, а во многих схемах до 50 пФ, что является следствием малой площади используемых переходов (обычно  $0,05 \text{ мм}^2$  и менее). Отклонение емкости такого конденсатора от номинальной обычно лежит в пределах  $\pm 20\%$ .

Резисторы полупроводниковых интегральных микросхем представляют собой участки легированного полупроводника с двумя выводами. Сопротивление такого резистора зависит от удельного сопротивления полупроводника и геометрических размеров резистора. Сопротивления резисторов обычно не превосходят нескольких килоом.

Все элементы полупроводниковых микросхем получают в едином технологическом цикле в кристалле полупроводника. На рис. 14.2 показана последовательность получения изолированных участков *n*-кремния. Такой технологический процесс содержит ряд этапов. Вначале на пластину исходного *n*-кремния методом фотолитографии наносится защитная маска и проводится избирательное травление исходного кристалла (рис. 14.2, а). Затем после смывания маски производится окисление поверхности кристалла кремния, на поверхности которого образуется изоляционный слой  $\text{SiO}_2$  (рис. 14.2, б).

На поверхность, защищенную  $\text{SiO}_2$ , напыляется поликристаллический слой кремния (рис. 14.2, в). И, наконец, после повторного травления исходного кристалла кремния образуются изолированные участки кремния *n*-типа (рис. 14.2, г).

В этих изолированных участках с помощью различных примесей (акцепторных и затем донорных) создаются участки с *p*- и *n*-проводимостью (рис. 14.3), которые образуют различные элементы микросхемы.

Для соединения элементов между собой применяются золотые или алюминиевые пленки, получаемые методом вакуумного напыления через маску соответствующей формы.

Соединение микросхемы с внешними выводами осуществляется золотыми или алюминиевыми проводами диаметром около 10 мкм. Такие проводники присоединяются к золотым или алюминиевым пленкам методом термокомпрессии и привариваются к внешним выводам микросхемы.

Полупроводниковые интегральные микросхемы помещаются в металлический или пластмассовый корпус. Изготовление микросхем в едином технологическом цикле позволяет существенно увеличивать число активных и пассивных элементов, практически без повышения трудоемкости изготовления. Это позволяет создавать весьма сложные микросхемы с большой (содержание более 150 элементов) и даже сверхбольшой (более 1000 элементов) степенью интеграции при вполне удовлетворительной себестоимости.

Полупроводниковые интегральные микросхемы рассчитываются на мощность порядка 50—100 мВт, могут работать до частот 20—100 мГц, обеспечивать время задержки не более 2—5 нс.

Надежность полупроводниковых интегральных микросхем весьма высока. В настоящее время в предельно нагруженных режимах среднее время безотказной работы может достигать  $(1 \div 2) \cdot 10^6$  ч.

В настоящей работе исследуются микросхема К1УТ401Б, входящая в серию К140, и микросхема К1КТ011А, входящая в серию К101.

Микросхемы серии К140 имеют следующие предельные эксплуатационные параметры:

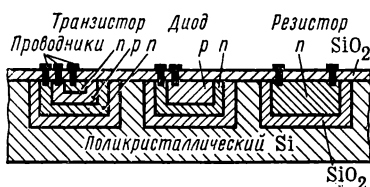


Рис. 14.3. Структура полупроводниковой интегральной схемы

Диапазон рабочих температур . . . . .	$-10 \div +70^{\circ}\text{C}$
Относительная влажность при температу- ре $20^{\circ}\text{C}$ . . . . .	до 98 %
Максимальное входное напряжение:	
для К1УТ401А . . . . .	$\pm 3 \text{ В}$
для К1УТ401Б . . . . .	$\pm 6 \text{ В}$
Максимальный выходной ток . . . . .	20 мА
Максимальный входной ток . . . . .	16 мкА
Максимальное напряжение источника пи- тания:	
для К1УТ401А . . . . .	$\pm 7,5 \text{ В}$
для К1УТ401Б . . . . .	$\pm 15 \text{ В}$

Электрические параметры микросхем серии К140 приведены в табл. 14.1.

Т а б л и ц а 14.1

Электрические параметры микросхем серии К140

Параметр	Микросхемы	
	К1УТ401А	К1УТ401Б
Напряжение источников питания	$\pm 6,3$	$\pm 12,6$
$U_{\text{пит}}, \text{В}$	$-6,3$	$-12,6$
Потребляемый ток $I_{\text{пит}}, \text{мА}$	4,2	8,0
Коэффициент усиления в режиме холостого хода $K_{U_{\text{х.х}}}$	От 400 до 4500	От 1300 до 12 000
Напряжение смещения $U_{\text{вх.см}}, \text{мВ}$	До $\pm 10$	До $\pm 10$
Выходное сопротивление $R_{\text{вых}}, \text{Ом}$	350	300
Входное сопротивление $R_{\text{вх}}, \text{кОм}$	От 10 до 40	От 7 до 35

Упрощенная электрическая схема К1УТ401Б приведена на рис. 14.4. Как видно из рисунка, микросхема К1УТ401Б представляет собой трехкаскадный усилитель постоянного тока.

Первый каскад усилителя выполнен по параллельной балансной схеме на транзисторах  $T_1$  и  $T_2$ . В эмиттерную цепь этих транзисторов включен стабилизатор тока на транзисторе  $T_3$ .

Второй каскад усилителя выполнен по несимметричной балансной схеме на транзисторах  $T_4$  и  $T_5$ .

Сигнал с коллектора  $T_5$  через делитель подается на эмиттерный повторитель на транзисторе  $T_6$ .

Усилитель имеет два входных зажима — инвертирующий 9 и неинвертирующий 10, соединенные с базами транзисторов  $T_2$  и  $T_1$ , и один выходной зажим, связанный с эмиттером транзистора  $T_6$ .

При подаче входного синусоидального напряжения на неинвертирующий вход выходное напряжение находится в фазе со входным. При подаче напряжения на инвертирующий вход выходное напряжение находится в противофазе со входным. Инвертирующий вход удобно использовать в цепи отрицательной обратной связи.

Амплитудная характеристика микросхем К1УТ401Б по неинвертирующему входу показана на рис. 14.5, на которой видно смещение

около 1 мВ. Такое смещение характерно для этих микросхем и должно приниматься во внимание при проектировании усилителей.

Полупроводниковая интегральная микросхема К1КТ011А представляет собой транзисторный прерыватель, предназначенный для коммутации слабых электрических сигналов переменного и постоянного тока. Состоит из двух кремниевых транзисторов типа *n-p-n* (рис. 14.6).

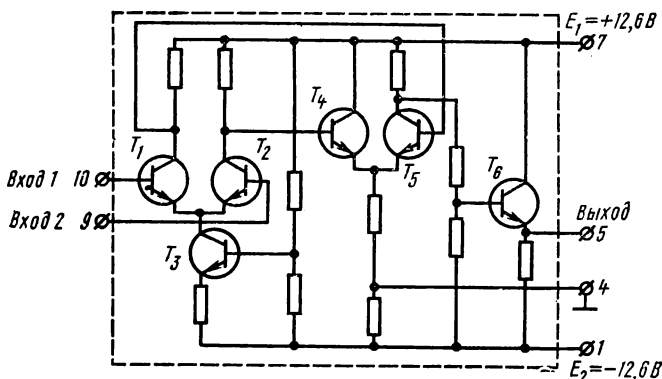


Рис. 14.4. Упрощенная электрическая схема К1УТ401Б

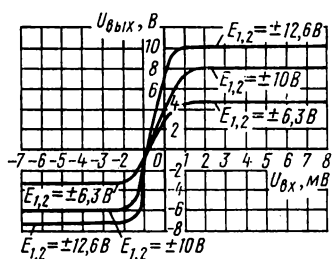


Рис. 14.5. Амплитудные характеристики микросхемы К1УТ401Б

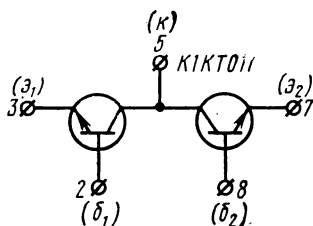


Рис. 14.6. Электрическая схема К1КТ011А

Микросхема К1КТ011А включается в коммутируемую цепь последовательно выводами 3 и 7. Выводы 2 и 8 являются управляющими, вывод 5 общий.

Электрические параметры микросхемы К1КТ011А приведены в табл. 14.2. Управляющее опорное напряжение, обычно прямоугольной формы, подается между общим выводом 5 и управляющими выводами 2 и 8. Когда на коллекторные переходы транзисторов подается прямое напряжение, ключ открыт и сопротивление между 3 и 7 мало, когда же на коллекторные переходы подается обратное напряжение, ключ закрыт и сопротивление между точками 3, 7 велико.



Микросхема К1КТ011А используется в схемах модуляторов и демодуляторов.

**Модулятор** — это устройство, предназначенное для преобразования постоянного или медленно изменяющегося напряжения в переменное модулированное напряжение. Схема модулятора и временные диаграммы его работы приведены на рис. 14.7 и 14.8. На

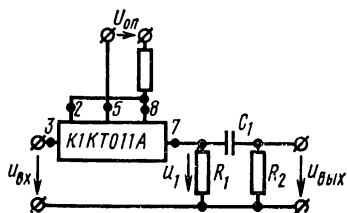


Рис. 14.7. Схема модулятора

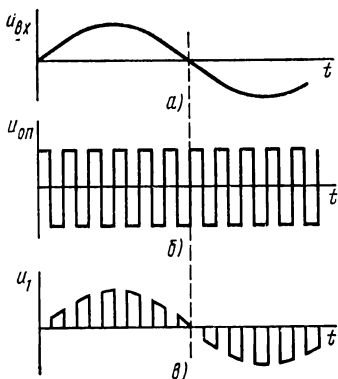


Рис. 14.8. Временные диаграммы модулятора

вход модулятора подается медленно изменяющееся синусоидальное напряжение (рис. 14.8, а). Микросхема К1КТ011А питается опорным напряжением прямоугольной формы (рис. 14.8, б). При положительной полярности напряжения микросхема закрыта (ее сопротивление велико) и напряжение  $U_1 = 0$ ; при отрицательной полярности

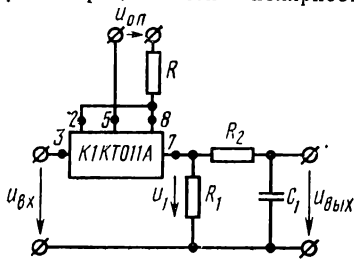


Рис. 14.9. Демодулятор на микросхеме К1КТ011А

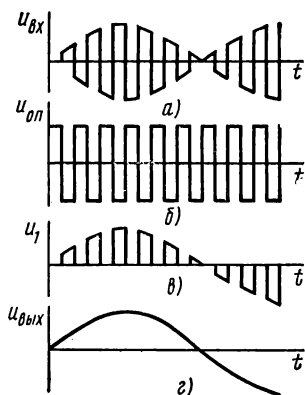


Рис. 14.10. Временные диаграммы демодулятора

опорного напряжения — открыта (ее сопротивление мало) и  $U_1 = U_{вх}$ . Таким образом, на резисторе  $R_1$  образуется последовательность модулированных импульсов напряжения (рис. 14.8, в) с огибающей, соответствующей входному напряжению. Конденсатор связи  $C_1$  не

пропускает постоянную (и низкочастотную) составляющую напряжения, и напряжение на выходе модулятора имеет симметричную форму.

Демодулятор служит для преобразования переменного напряжения в постоянное. Демодулятор на микросхеме К1КТ011А показан на рис. 14.9. На вход демодулятора поступает переменное модулированное напряжение (рис. 14.10, а) и опорное напряжение (рис. 14.10, б). На резисторе  $R_1$  напряжение  $u_1$  состоит из однополярных импульсов (рис. 14.10, в), проходящих через открытую микросхему К1КТ011А. Выходное напряжение после резисторно-конденсаторного фильтра содержит только медленно изменяющееся напряжение (рис. 14.10, г).

Таблица 14.2

#### Электрические параметры микросхемы К1КТ011А

Параметр	Значение
Ток утечки между эмиттерами закрытого ключа $I_{ут}$	40 нА
Динамическое сопротивление открытого ключа $R_{откр}$	100 Ом
Остаточное напряжение между эмиттерами $U_{ост}$	100 мкВ
Максимальный ток коллектора $I_{к.доп}$	10 мА
Максимальное напряжение на коллекторных переходах $U_{к.доп}$	3,5 В
Максимальное напряжение на эмиттерных переходах $U_{э.доп}$	6,5 В

При подаче на вход демодулятора напряжения, находящегося в квадратуре к опорному напряжению (фазовый угол  $\pm 90^\circ$ ), выходное напряжение демодулятора равно нулю.

#### ОПИСАНИЕ ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ ПАНЕЛИ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Испытательная панель приведена на рис. 13.8. В настоящей работе используются: усилитель на микросхеме К1УТ401Б, модулятор и демодуляторы на микросхемах К1КТ011А, потенциометр  $P_1$ , делитель  $D_1$ , эквиваленты нагрузки  $H_1$ ,  $H_2$ ,  $H_3$  и  $H_4$  и мост Вина МВ.

#### ЗАДАНИЕ

А. Выполняется при подготовке к работе

Рассчитать коэффициент передачи стабилизирующего четырехполюсника обратной связи  $\beta$ , обеспечивающего напряжение смещения на выходе микросхемы К1УТ401Б не более 0,1 В.

## Б. Выполняется в лаборатории

1. Снять амплитудные характеристики микросхемы К1УТ401Б при сопротивлении нагрузки  $R_H = \infty$  и  $R_H = 1$  кОм. Определить напряжение смещения  $U_{\text{вх.см}}$ , коэффициент усиления на линейном участке, допустимые  $U_{\text{вх}}$  и  $U_{\text{вых}}$ .

2. Собрать генератор синусоидальных колебаний на микросхеме К1УТ401Б с мостом Вина в цепи положительной обратной связи. Определить частоту выходного напряжения генератора, зарисовать форму выходного напряжения при минимальных искажениях выходного напряжения и при некотором уменьшении глубины отрицательной обратной связи.

3. Собрать модулятор на микросхеме К1КТ011А и определить его коэффициент передачи. Зарисовать осциллограмму выходного напряжения.

4. Собрать демодулятор на микросхеме К1КТ011А и определить его коэффициент передачи при синфазном и квадратурном сигнале. Зарисовать осциллограммы входного и выходного напряжений.

5. Собрать УПТ с преобразованием напряжения, измерить коэффициент усиления  $K_U$  при  $U_{\text{вых}} = 0,2$  В.

### МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

а) Входное напряжение смещения  $U_{\text{вх.см}}$  для микросхемы К1УТ401Б может достигать 10 мВ, что вызывает появление на выходе микросхемы большого постоянного напряжения  $U_{\text{вых.см}} = KU_{\text{вх.см}}$ , где  $K$  — коэффициент усиления микросхемы. Для снижения  $U_{\text{вых.см}}$  включается цепь стабилизирующей отрицательной обратной связи, работающей на постоянном токе. При включенной цепи обратной связи

$$U_{\text{внх.см}} = K_{\text{ос}} U_{\text{вх.см}},$$

$$\text{где} \quad K_{\text{ос}} = \frac{K}{1 + \beta K} = \frac{U_{\text{внх.см}}}{U_{\text{вх.см}}}.$$

По указанным выражениям может быть определен коэффициент передачи четырехполосника стабилизирующей обратной связи.

б) Для снятия амплитудной характеристики микросхемы собирается электрическая цепь рис. 14.11. Постоянное регулируемое напряжение с потенциометра  $\Pi_1$  подается через калиброванный делитель  $D_1$  на вход микросхемы К1УТ401Б. Микросхема нагружена на регулируемый резистор  $H_1$ . Входное напряжение определяется по вольтметру.

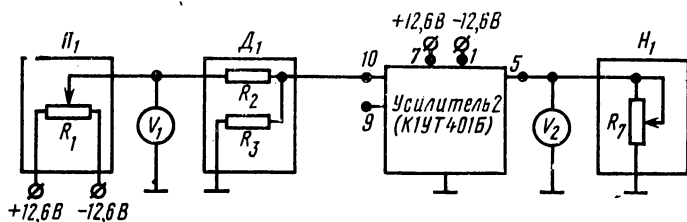


Рис. 14.11. Схема для снятия амплитудной характеристики микросхемы К1УТ401Б

С учетом коэффициента передачи делителя  $D_1$  показания вольтметра должны быть умножены на  $\alpha=0,001$ :

$$U_{\text{вх}} = \alpha U_1 = 0,001 U_1.$$

Выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$  измеряется вольтметром  $V_2$ . Затем, изменяя напряжение  $U_1$ , добиваются нулевого напряжения на выходе микросхемы. При  $U_{\text{вых}}=0$  определяется входное напряжение смещения  $U_{\text{вх.см.}}$ . Изменяя величину  $U_{\text{вх}}$  как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения от  $U_{\text{вх.см.}}$ , снимают амплитудную характеристику  $U_{\text{вых}}=f(U_{\text{вх}})$  (5—6 точек в каждую сторону от  $U_{\text{вх.см.}}$ ). Характеристики снимаются при подаче входного напряжения на неинвертирующий вход 10.

Коэффициент усиления по напряжению определяется как  $K_U = \left| \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta U_{\text{вх}}} \right|$  при изменении выходного напряжения от 0 до 2 В.

в) Схема генератора синусоидальных колебаний на микросхеме К1УТ401Б с мостом Вина в цепи обратной связи приведена на рис. 14.12. Мост Вина ( $MВ$ ) включен в цепь положительной обратной связи (между выходом и неинвертирующим входом микросхемы). В цепь отрицательной обратной связи включен делитель  $D_2$ , при по-

мощи которого устанавливается коэффициент усиления усилителя  $K_{ос}=3$ . К выходу генератора подключено нагрузочное устройство  $H_2$ . Выходное напряжение измеряется вольтметром  $V_3$  и подается на вход осциллографа. Частота колебаний генератора определяется при помощи осциллографа.

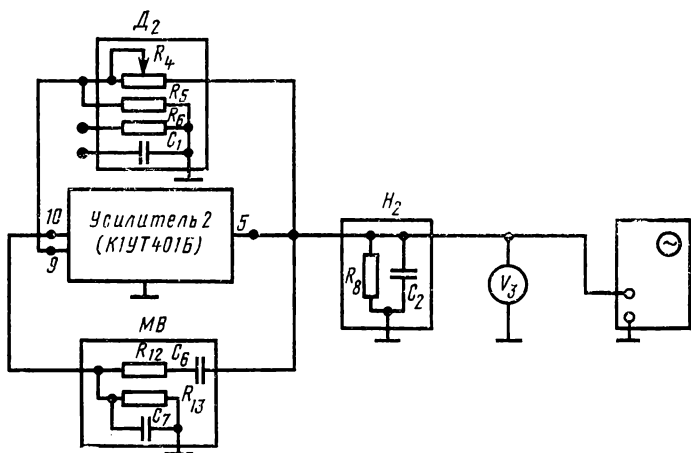


Рис. 14.12. Схема для исследования  $RC$ -генератора на микросхеме К1УТ401Б

Настройка генератора осуществляется подбором коэффициента передачи  $\beta$  в цепи отрицательной обратной связи. Для этого плавным вращением ручки потенциометра  $R_4$  надо добиться величины выходного напряжения в пределах  $2 \text{ В} \leq U_{\text{вых}} \leq 3 \text{ В}$ . При таком уровне выходного напряжения микросхема К1УТ401Б работает на линейном участке амплитудной характеристики и искажения выходного напряжения минимальны. Даже небольшое увеличение сопротивления резистора  $R_4$ , уменьшающее глубину отрицательной обратной связи, приводит к возрастанию  $K_{ос} > 3$ , амплитуда выходного напряжения возрастает и появляются искажения.

г) Схема для исследования модулятора на микросхеме К1КТ011А показана на рис. 14.13. На вход модулятора подается постоянное напряжение с потенциометра  $\Pi_1$ . На выходе модулятора включено нагрузочное устройство  $H_3$ . Выходное напряжение измеряется вольтметром

переменного напряжения и подается на вход осциллографа.

Коэффициент передачи модулятора определяется по выражению  $K = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$  при  $U_{\text{вх}} = 1$  В.

д) Схема для исследования демодулятора приведена на рис. 14.14. На вход демодулятора подается перемен-

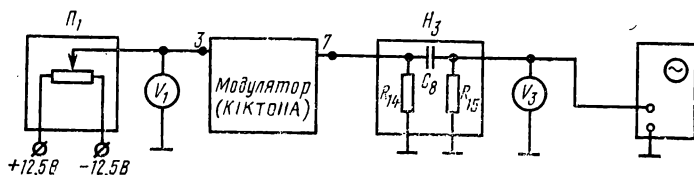


Рис. 14.13. Схема для исследования модулятора на микросхеме К1КТ011А

ное напряжение 1 В в фазе (синфазное) или под углом  $90^\circ$  (квадратурное) по отношению к опорному напряжению. С выхода демодулятора напряжение подается на нагрузочное устройство  $H_4$ , состоящее из Г-образного RC-фильтра ( $R_{16}$ ;  $C_{10}$ ) и резистора  $R_{17}$ . Выходное напряжение измеряется вольтметром  $V_1$ .

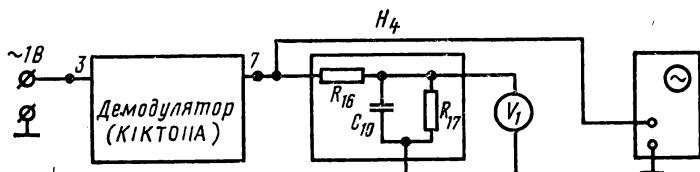


Рис. 14.14. Схема для исследования демодулятора на микросхеме К1КТ011А

Коэффициент передачи демодулятора определяется по выражению  $K = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$ .

е) Схема для исследования УПТ приведена на рис. 14.15. Входное постоянное напряжение с потенциометра  $\Pi_1$  через делитель  $D_1$  подается на вход усилителя (на модулятор). Модулятор соединен с усилителем переменного напряжения на микросхеме К1УТ401Б через разделительный фильтр нагрузочного устройства  $H_3$ . Усилитель охвачен отрицательной обратной связью на постоянном токе.

Для этого служит четырехполюсник  $D_2$  с конденсатором фильтра  $C_1$ . Такая обратная связь обеспечивает эффективную температурную стабилизацию режимов усилителя.

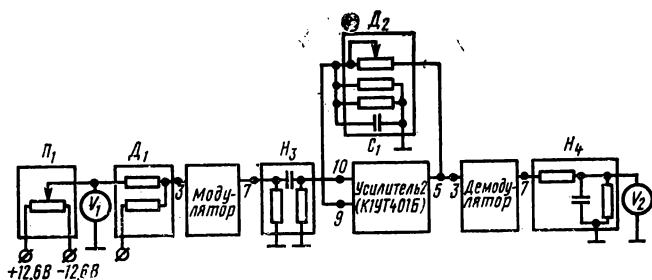


Рис. 14.15. Схема для исследования УПТ с преобразованием напряжения на микросхемах

Напряжение с выхода усилителя через демодулятор подается на нагрузочное устройство с фильтром  $H_4$ . Выходное напряжение измеряется вольтметром  $V_2$ .

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем отличие полупроводниковых и гибридных микросхем?
2. Для чего микросхемы помещаются в корпусе?
3. Из каких каскадов состоит микросхема К1УТ401Б?
4. Как работает микросхема К1КТ011А?
5. Для чего включаются обратные связи в усилителе на микросхеме К1УТ401Б?
6. Как измеряется коэффициент передачи модулятора?
7. Для чего применяется обратная связь в УПТ с преобразованием спектра сигнала?
8. Как измеряется коэффициент передачи демодулятора?
9. Какова форма опорного напряжения модулятора и демодулятора?
10. Каковы должны быть фазовые соотношения входного и опорного напряжений демодулятора?
11. Какова частотная характеристика УПТ с преобразованием спектра сигнала?
12. Какова форма напряжения на выходе демодулятора?
13. Какова форма напряжения на выходе модулятора?
14. Какова технология изготовления полупроводниковых микросхем?
15. Как изготавливаются резисторы в полупроводниковой микросхеме?
16. Как изготавливаются конденсаторы в микросхеме?
17. Как осуществляется соединение элементов в микросхеме?

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ВОЛЬТМЕТР

Универсальный электронный вольтметр типа В7-15 предназначен для измерения напряжения постоянного тока, действующего значения переменного напряжения синусоидальной формы и активного сопротивления.

Вольтметр выполнен в настольном переносном виде. Передняя панель закрывается крышкой, на внутренней стороне которой имеются краткие указания по эксплуатации и технические характеристики. Отсчет измеряемого напряжения или сопротивления производится непосредственно по стрелочному прибору, шкала которого проградуирована в вольтах и омах. С помощью специального щупа, которым укомплектован прибор, можно измерять напряжения в цепях с высокой частотой.

Вольтметр позволяет измерять:

1) постоянные напряжения от 0,3 В до 1000 В с пределами измерений 0,3; 1; 3; 10; 30; 100; 300 и 1000 В.

2) переменные напряжения от 0,2 до 100 В на частотах 20 Гц ÷ 700 мГц и от 100 до 1000 В на частотах 20 Гц ÷ 300 мГц с пределами измерений 1; 3; 10; 30; 100; 300 и 1000 В;

3) активные сопротивления от 10 до  $10^9$  Ом; основная погрешность измерения:

при измерениях постоянных напряжений через входные клеммы составляет  $\pm 2,5\%$ ;

при измерениях переменных напряжений через входные клеммы до пределов 10, 30, 100 В —  $\pm 2,5\%$ , на пределах 1, 3, 300, 1000 В —  $\pm 4\%$ .

Универсальный вольтметр типа В7-15 может работать в полевых, цеховых и лабораторных условиях. Входное сопротивление прибора при измерениях постоянных напряжений до 1000 В имеет величину 15 МОм. При измерениях переменных напряжений на частоте до 1 кГц входное сопротивление не превышает 3 МОм, а при измерениях на частоте 100 МГц — 50 кОм. Входная емкость прибора при измерениях переменных напряжений с помощью входных клемм должна быть не более 10 пФ на пределах 300 и 1000 В, 30 пФ — на пределах 1, 3, 10, 30 и 100 В. На передней панели (рис. П.1) располагаются измерительный стрелочный прибор, кнопки переключателя рода работ, ручка переключателя пределов измерения, входные



клеммы  $K_1$ — $K_8$ , клемма заземления  $K_9$ , сигнальная лампа, гнездо для пробника, кабель питания, ручки потенциометров установки нуля при измерении: постоянного напряжения «0», переменного напряжения «0~1V» и активного сопротивления «0Ω».

На рис. П.2 изображена блок-схема прибора. Как и все электронные вольтметры, выпускаемые промышленностью, данный прибор содержит делители напряжения, амплитудные детекторы и усилитель постоянного тока. Если измеряемое постоянное напряжение лежит в пределах 0,3÷10 В, то оно подается на клеммы  $K_4$  и  $K_5$  (см. рис. П.1) и с них сразу поступает на вход усилителя постоянно-

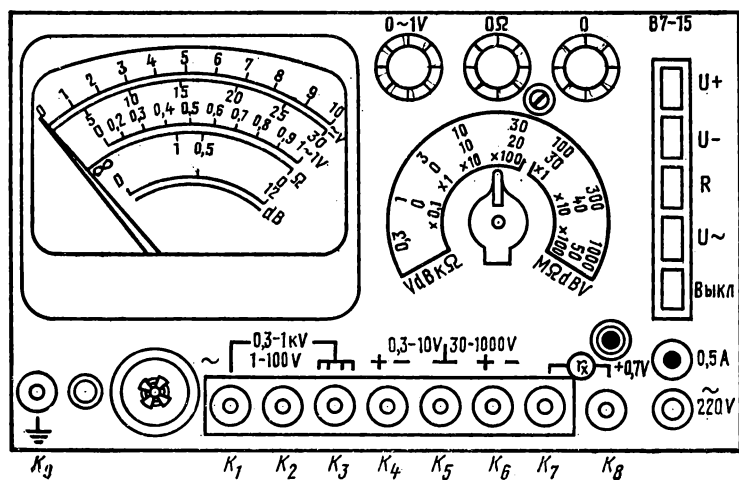


Рис. П.1. Передняя панель универсального вольтметра В7-15

го тока, на выходе которого включен измерительный прибор ИП (микроамперметр типа М1690А-16). В случае измерений постоянных напряжений величиной 30÷1000 В измеряемое напряжение подается на зажимы  $K_5$  и  $K_6$ , далее проходит через делитель напряжения, а затем поступает на усилитель постоянного тока. При измерениях переменных напряжений с частотой не более 5 кГц измеряемое напряжение подается:

на зажимы  $K_2$  и  $K_3$ , если напряжение находится в диапазоне 1÷100 В;

на зажимы  $K_1$  и  $K_3$ , если напряжение лежит в пределах 0,3÷÷1 кВ.

Далее измеряемое напряжение подается на вход амплитудного детектора, затем усиливается усилителем постоянного тока и с него поступает на измерительный прибор ИП.

Если необходимо измерять переменное напряжение с частотой от 5 кГц до 300 МГц, то необходимо воспользоваться выносным пробником, являющимся амплитудным детектором. Для этого следует центральный штырь пробника подсоединить к измеряемому объекту,

а надетый на пробник металлический хомутик соединить с заземленной точкой исследуемой цепи.

При подготовке прибора к работе следует подключить кабель питания к сетевой розетке. Включение вольтметра производится нажатием на одну из кнопок переключателя рода работ: при измерениях постоянных напряжений на кнопку « $U_+$ » или « $U_-$ », а при измерениях переменных напряжений — на кнопку « $U_{\sim}$ ». При этом должна загореться сигнальная лампа. После прогрева прибора в течение 10÷15 мин следует установить стрелку прибора ИП на нуль, т. е. следует сбалансировать УПГ.

Для этого при измерениях постоянных напряжений переключатель пределов измерения необходимо поставить в положение «0,3 V», нажать на кнопку « $U_+$ » или « $U_-$ » (в соответствии с полярностью измеряемого напряжения), замкнуть входные клеммы «0,3÷10» и ручкой «0» установить стрелку микроамперметра на нулевую отметку шкалы « $\approx V$ ».

Далее следует установить с помощью ручки переключателя пределов измерений необходимый предел измерений, и прибор готов к работе.

При измерениях переменных напряжений установку стрелки прибора на нуль следует начинать с того, что устанавливают пробник в гнездо. Затем переключатель пределов ставят в положение «1V» и нажимают на кнопку « $U_{\sim}$ ». Замкнув входные клеммы «1÷100 V», устанавливают стрелку на нулевую отметку по шкале « $\sim 1 V$ » ручкой «0~1 V». Далее устанавливают необходимый предел измерений, и вольтметр готов к работе.

Для измерений активного сопротивления переключатель пределов следует установить на необходимый предел и нажать кнопку «R». После этого вольтметр необходимо откалибровать. Для этого при отсутствии измеряемого сопротивления (при разомкнутых клеммах «гх» ручкой «0 $\Omega$ » устанавливают стрелку прибора на отметку « $\infty$ » по шкале « $\Omega$ ». Замкнув клеммы «гх», устанавливают стрелку прибора с помощью ручки «0 $\Omega$ » на нуль шкалы « $\Omega$ ». Далее можно измерять активное сопротивление.

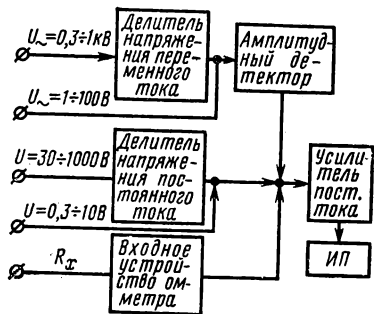


Рис. П.2. Структурная схема универсального вольтметра В7-15

## ЦИФРОВОЙ ШИТОВОЙ ВОЛЬТМЕТР

Цифровой щитовой вольтметр позволяет производить измерения постоянных и переменных напряжений с представлением результатов измерений в цифровой форме. Применяемые цифровые вольтметры могут измерять напряжение от 0,1 до 1000 В частотой от 40 до 5000 Гц с точностью до 1,0%. Время непрерывной работы не должно превышать 500 ч. Питание прибора производится от сети с напряжением  $220 \pm 10\%$ . Помимо измерений напряжений с помощью указанных вольтметров можно контролировать параметры производ-

ственных процессов, вводить информацию в электронно-вычислительные машины и т. п.

Отсчетное устройство прибора позволяет видеть на его шкале три цифры, обозначение знака «·», отделяющего целую часть числа от дробной, а также обозначение «V» (рис. П.3). В случае превышения измеряемой величины конечного значения диапазона измерения отсчетное устройство обеспечивает сигнализацию перегрузки зажиганием лампы «Перегрузка». Прибор может выдерживать полторакратную перегрузку в течение 10 с.

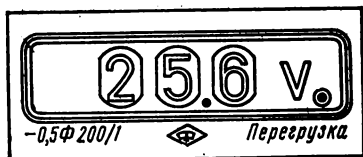


Рис. П.3. Передняя панель цифрового вольтметра Ф-200

Принцип действия цифрового вольтметра заключается в преобразовании величины измеряемого напряжения в соответствующее число импульсов, в зависимости от которого загорается определенная цифра цифрового индикатора тлеющего ряда. Измеряемое переменное напряжение преобразуется в постоянное с помощью соответствующего преобразователя, включенного на входе прибора (рис. П.4). Полученное постоянное напряжение  $U_x$

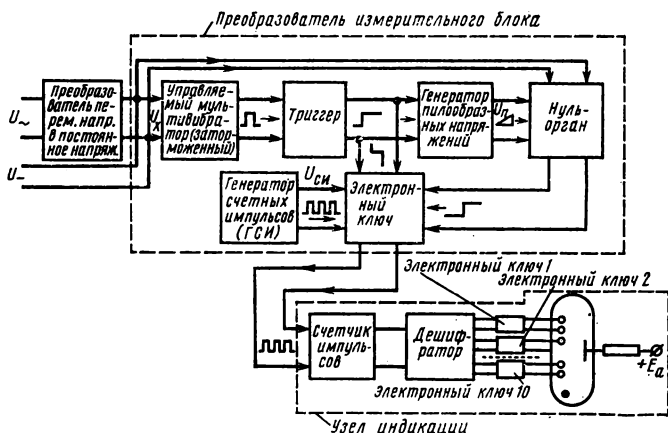


Рис. П.4. Структурная схема цифрового вольтметра типа Ф-200

поступает на вход преобразователя измерительного блока, где запускает заторможенный мультивибратор, и на вход нуля-органа. Выходной сигнал мультивибратора заставляет срабатывать триггер, который одновременно запускает генератор пилообразных напряжений и электронный ключ, пропускающий импульсы от генератора счетных импульсов  $U_{си}$  на выход преобразователя измерительного блока.

Пилообразное напряжение  $U_{п}$  в нуля-органе сравнивается с измеряемым напряжением  $U_x$  (рис. П.5). В тот момент ( $t_1$ ), когда пи-

лообразное напряжение станет равным измеряемому напряжению, сигнал с нуля-органа закрывает электронный ключ и тем самым прекращает поступление импульсов на выход измерительного преобразователя. Таким образом, число импульсов, появившихся на выходе преобразователя измерительного блока, будет пропорционально измеряемому напряжению. Далее серия импульсов поступает на вход узла индикации, задача которого заключается в преобразовании определенного числа импульсов в визуальную индикацию с помощью цифрового индикатора. На входе узла индикации стоит счетчик, который регистрирует поступающую серию импульсов. В зависимости от числа поступающих импульсов дешифратор открывает определенный электронный ключ (один из десяти), после чего загорается соответствующая цифра цифрового индикатора.

В случае измерения постоянных напряжений измеряемое напряжение подается на преобразователь измерительного блока, минуя преобразователь переменного напряжения в постоянное.

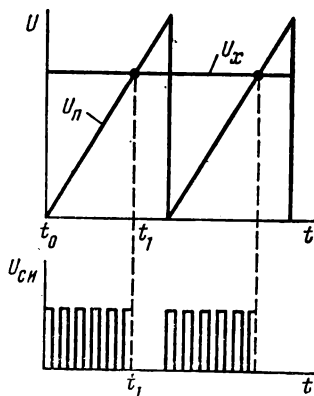


Рис. П.5. Временные диаграммы получения серии счетных импульсов ( $U_{с.н}$ ), пропорциональной измеряемому напряжению ( $U_x$ )

## ГЕНЕРАТОР СТАНДАРТНЫХ СИГНАЛОВ ТИПА ГЗ-36

При проведении лабораторных работ применяется источник синусоидальных электрических колебаний звуковых и ультразвуковых частот типа ГЗ-36. Этот прибор предназначен для регулировки и испытаний на низкой и ультразвуковой частоте электронной аппаратуры в лабораторных и производственных условиях.

Электрические колебания создаются автогенератором  $RC$ -типа (рис. П.6). Автогенератор АГ включает в себя 3-каскадный транзисторный усилитель, охваченный положительной обратной связью.

Звеном обратной связи является  $RC$ -мост Вина, элементы которого определяют частоту генерируемых колебаний. Ступенчатое изменение частоты в генераторе осуществляется переключением конденсаторов, а плавное — двоянными резисторами моста Вина.

Основной технической характеристикой генератора типа ГЗ-36 является диапазон генерируемых электрических колебаний, составляющий 20 Гц—200 кГц. Этот диапазон перекрывается с помощью 4 поддиапазонов, в пределах которых частота регулируется плавно: от 20 до 200 Гц, от 200 до 2000 Гц, от 2 до 20 кГц, от 20 до 200 кГц.

В генераторе имеется возможность регулировать выходное напряжение плавно и ступенчато от 0 до 5 В.

Электрические колебания с автогенератора поступают на 3-каскадный усилитель, состоящий из усилителя напряжения УН, фазоинверсного каскада ФИ и усилителя мощности УМ. Плавное изменение

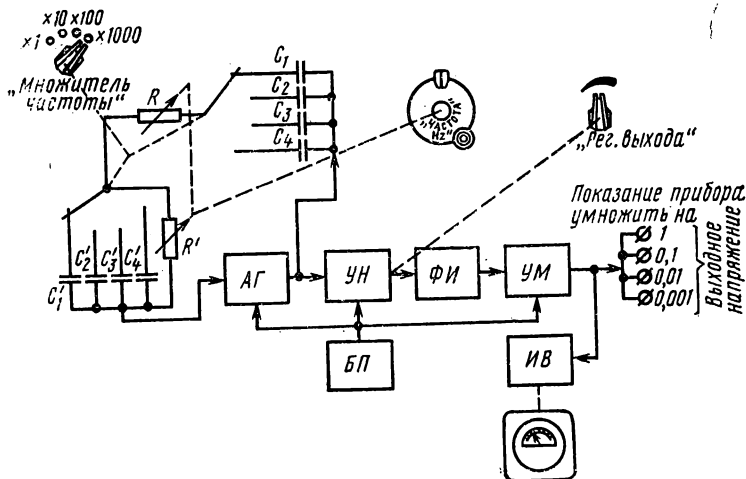


Рис. П.6. Структурная схема генератора ГЗ-36

выходного напряжения осуществляется потенциометром, включенным на выходе усилителя напряжения УН. На выходе усилителя УМ включены 3-ступенчатый делитель напряжения, обеспечивающий уменьшение выходного напряжения в 10, 100 и 1000 раз, и индикатор выхода, которым является стрелочный прибор (микроамперметр типа М-260), проградуированный в вольтах.

Индикатор выхода, как видно из блок-схем рис. П.6, установлен до делителя. Поэтому для определения выходного напряжения генератора необходимо показание индикатора выхода умножить на один из коэффициентов деления ступенчатого делителя — 1; 0,1; 0,01; 0,001 — в зависимости от того, с каких гнезд делителя снимается выходное напряжение. Питание автогенератора и усилителей осуществляется от мостового выпрямителя, куда также входит С-фильтр и электронный компенсационный стабилизатор напряжения.

На рис. П.7 изображен внешний вид прибора. На передней па-

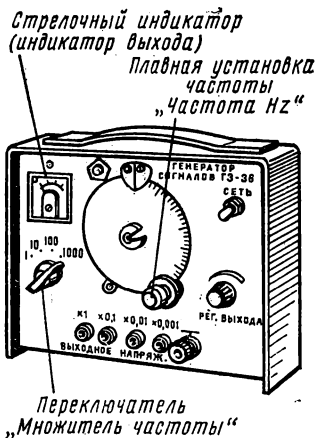


Рис. П.7. Внешний вид генератора ГЗ-36

иел генератора расположены: тумблер «Сеть», сигнальная лампочка, стрелочный прибор (индикатор выхода) для контроля выходного напряжения; переключатель «Множитель частоты», ручка «Рег. выхода» — для плавной установки выходного напряжения; ручка и вращающаяся шкала «Частота  $H_z$ »; клемма « $\perp$ » — для заземления прибора; четыре гнезда «Выходное напряжение» — для установки выходного напряжения от 0 до 5 В.

Для подсоединения генератора к исследуемой цепи следует одним из проводников соединить гнездо «земля» (« $\perp$ ») с «землей» исследуемой цепи, а другим проводником — одно из гнезд делителя со входом схемы. Порядок работы с генератором типа ГЗ-36 следующий. Прежде всего необходимо установить тумблер «Сеть» в положение «Вкл.» (при этом должна загореться сигнальная лампочка) и дать прогреться прибору в течение 5 мин. После этого переключателем «Множитель частоты» и ручкой плавной регулировки частоты необходимо установить требуемую частоту, а ручкой «Рег. выхода» установить по шкале индикатора выхода требуемое выходное напряжение. По окончании работы прибор необходимо выключить.

### ОПИСАНИЕ ОСЦИЛЛОГРАФА ТИПА С1-68

Универсальный осциллограф С1-68 предназначен для визуальных наблюдений и исследований электрических сигналов. С его помощью можно производить измерения напряжений, фазовых сдвигов, частоты электрических сигналов и т. д.

Осциллограф С1-68 позволяет:

1. Наблюдать периодические сигналы частотой от 0,06 Гц до 1 мГц.

2. Наблюдать форму импульсов обеих полярностей длительно-стью от 2 мкс до 16 с.

3. Измерять амплитуды исследуемых напряжений в диапазоне от 2 мВ до 300 В, а с выносным делителем 1:10 — от 20 мВ до 350 В.

4. Измерять временные интервалы от 2 мкс до 16 с.

У рассматриваемого осциллографа:

а) входное сопротивление  $1 \text{ МОм} \pm 2\%$  при входной емкости  $50 \text{ пФ} \pm 10\%$ ; с выносным делителем 1:10 входное сопротивление —  $10 \text{ МОм} \pm 10\%$ , а входная емкость не превышает 15 пФ;

б) погрешность измерения амплитуды синусоидальных сигналов в диапазоне частот от 0,6 до 200 кГц не более  $\pm 10\%$ , а погрешность измерения амплитуд прямоугольных импульсов длительно-стью от 2 мкс и частотой следования до 10 кГц не более  $\pm 5\%$ ;

в) погрешность измерения временных интервалов не более  $\pm 10\%$ .

В осциллографе предусмотрена возможность подачи исследуемых напряжений с частотой от 20 кГц до 10 МГц непосредственно на отклоняющие пластины электроннолучевой трубки типа 11Л05В, у которой чувствительность пластин «Y» имеет величину 1 мм/В, а чувствительность пластин «X» — 0,6 мм/В. Подключение отклоняющих пластин следует производить с помощью внешних конденсаторов емкостью 0,1 мкФ и  $U_{раб} = 400 \text{ В}$ .

На рис. П.8 изображена блок-схема осциллографа С1-68. Исследуемый сигнал подается на вход (« $\leftrightarrow$ »)  $1 \text{ М}\Omega$  50 pF». Входной аттенуатор, представляющий собой резистивно-емкостной делитель напряжения, имеет 12 ступеней деления: 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000, которые устанавливают ступенчато и плавно соответственно ручками «V/см, mV/см» и «Усиление». Такой делитель

The diagram illustrates the internal structure of a television receiver, divided into two main functional blocks: the vertical deflection amplifier and the horizontal deflection amplifier.

**Усилитель вертикального отклонения (Vertical Deflection Amplifier):**

- Вход (Input):** Labeled "Вход" with a symbol indicating a 1 MΩ 50 pF input impedance.
- Входной аттенуатор (Input Attenuator):** The first stage of the vertical deflection amplifier.
- Входной каскад (Input Stage):** The first active stage of the vertical deflection amplifier.
- Предварительный усилитель (Pre-amplifier):** The second active stage of the vertical deflection amplifier.
- Оконечный каскад (Output Stage):** The final active stage of the vertical deflection amplifier, which drives the vertical deflection coil of the CRT.

**Блок синхронизации (Synchronization Block):**

- Вход (Input):** Labeled "Вход" with a symbol indicating a 1 MΩ 50 pF input impedance.
- Усилитель-ограничитель (Limiting Amplifier):** The first stage of the synchronization block.
- Дифференциальная RC-цепочка (Differential RC Network):** The second stage of the synchronization block.
- Триггер управления развертки (Sawtooth Trigger):** The third stage of the synchronization block, which generates the sawtooth voltage for the horizontal deflection amplifier.

**Блок горизонтальной развертки (Horizontal Deflection Block):**

- Генератор пилообразного напряжения (Sawtooth Voltage Generator):** The first stage of the horizontal deflection block, which generates the sawtooth voltage for the horizontal deflection amplifier.
- Усилитель горизонтального отклонения (Horizontal Deflection Amplifier):** The final stage of the horizontal deflection block, which drives the horizontal deflection coil of the CRT.

**Other Components and Connections:**

- Калибратор амплитуды (Amplitude Calibrator):** A component used for testing and calibration, connected to the input of the vertical deflection amplifier. It has a "Выход" (Output) labeled "2 kHz 100 mV" and another "Выход" labeled "18".
- Схема гашения обратного хода луча (Beam-Blanking Circuit):** A circuit that controls the beam during the horizontal blanking interval, connected to the output of the horizontal deflection amplifier.
- Символы:** The diagram uses standard electronic symbols for input/output terminals, ground, and a speaker icon for the CRT.

вается тем, что входной каскад усилителя вертикальной развертки выполнен на полевом транзисторе. На другую пару пластин — горизонтального отклонения — подается пилообразное напряжение с генератора пилообразного напряжения после усиления в усилителе горизонтального отклонения. В цепи развертки предусмотрена как ступенчатая, так и плавная регулировка частоты пилообразных колебаний. Ступенчатая регулировка производится грубо с помощью тумблера-множителя « $\times 1$ », « $\times 0,2$ », ручкой переключателя «Время/см» и плавно — ручкой «Длительность». Для получения на экране осциллографа неподвижного изображения необходимо осуществить принудительное генерирование сигналов пилообразного напряжения с частотой, равной или кратной частоте исследуемого сигнала. Это соотношение частот обеспечивается с помощью блока синхронизации. Усиленный исследуемый сигнал одновременно поступает как на вертикально отклоняющие пластины ЭЛТ, так и на вход блока синхронизации. В этом блоке он вначале усиливается и ограничивается в усилителе-ограничителе, а затем дифференцируется  $RC$ -цепочкой, после чего поступает на вход триггера управления. Триггер вырабатывает прямоугольные импульсы, являющиеся импульсами синхро-

низации, которые, поступая на вход генератора пилообразных напряжений (ГПН), синхронизируют частоту генерации импульсов пилообразной формы с частотой исследуемых сигналов. Происходящие в блоке синхронизации преобразования необходимы для того, чтобы с выхода триггера получать прямоугольные импульсы постоянной амплитуды, не зависящие от величины и формы сигналов, приходящих с оконечного каскада вертикального усилителя.

Для устранения свечения луча на экране при обратном ходе на модулятор в начале обратного хода луча подается большое отрицательное напряжение, запирающее ЭЛТ. Это напряжение вырабатывается блоком гашения обратного хода луча, управляемого триггером управления развертки. Запуск ГПН можно производить от внешнего источника синхронизации («Внешняя синхронизация») через соответствующее гнездо, обозначенное «→». □».

В рассматриваемом осциллографе предусмотрена возможность подачи внешнего сигнала на усилитель развертки с последующим выходом на пластины горизонтального отклонения. Для этого сигнал необходимо подавать на вход «Х». При этом генератор развертки отключается от усилителя горизонтальной развертки.

У большинства современных осциллографов, в том числе и у осциллографа типа С1-68, имеется блок, называемый калибратором амплитуды, представляющий собой генератор импульсов прямоугольной формы величиной 100 мВ и 1 В и с частотой повторения 2 кГц. С помощью калибратора амплитуды можно производить измерение амплитуды исследуемого сигнала путем сравнения амплитуд калибровочного напряжения и исследуемого.

Калибровка осциллографа по амплитуде производится при установке ручки «Усилитель» в крайнее правое положение «Калибр» (рис. П.9). При больших амплитудах исследуемого сигнала, когда его изображение на экране ЭЛТ превышает 50 мм, калибровку производят в положениях переключателя «V/см, mV/см» на делениях 2 mV/см; 20 mV/см и 0,2 V/см.

Если амплитуда исследуемого сигнала невелика, т. е. изображение на экране ЭЛТ не превышает 35 мм, то калибровку производят при положениях переключателя «V/см, mV/см» на делениях 5 mV/см; 50 mV/см и 0,5 V/см.

В блок питания осциллографа входят выпрямитель и компенсационный электронный стабилизатор, что обеспечивает устойчивую работу осциллографа при изменении напряжения питания сети 220 В на  $\pm 10\%$ .

На передней панели осциллографа (рис. П.9) расположены следующие основные ручки управления: 1) тумблер «Сеть» для включения и выключения осциллографа; 2) ручка «Яркость» для установки необходимой яркости луча; 3) ручка «Фокус» для фокусировки луча ЭЛТ; 4) ручка «Освещение шкалы» для регулировки освещения шкалы.

*К усилителю «У» относятся*

5) переключатель « $\sim$ ,  $\simeq$ », для выбора входа усилителя при осциллографировании соответственно пульсирующего или переменного сигнала;

6) гнездо «→) 1М  $\Omega$  50p F» для подачи исследуемого сигнала на осциллограф;

7) ручка переключателя «V/см, mV/см» для переключения делителя входного attenuатора;



- 8) ручка «Усиление» для плавной регулировки коэффициента усиления усилителя;
- 9) ручка « $\updownarrow$ » для перемещения луча по вертикали;
- 10) ручка «Баланс» для балансировки усилителя;
- 11) тумблер « $\times 1$ — $\times 10$ » для ступенчатого изменения чувствительности усилителя.

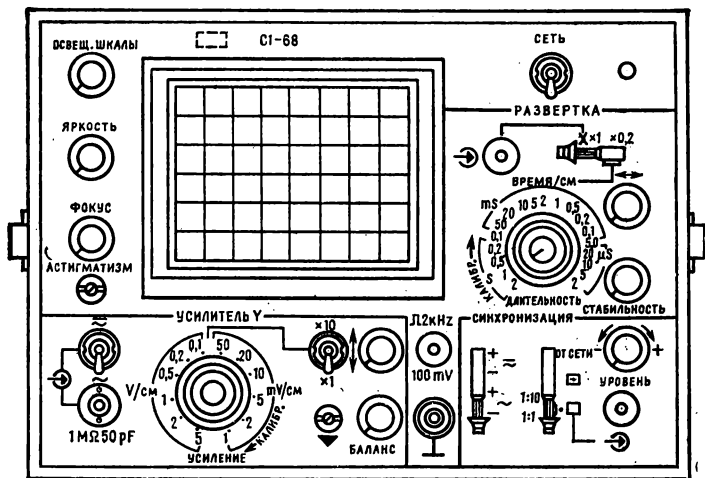


Рис. П.9. Передняя панель осциллографа С1-68

*К развертке относятся*

- 12) гнездо « $\rightarrow$ ) X» для подачи внешнего сигнала на усилитель горизонтального отклонения;
- 13) переключатель «X,  $\times 1$ ,  $\times 0,2$ » соответственно для подключения входа «X» к усилителю горизонтального отклонения, для подачи пилообразного напряжения на пластины «X» осциллографа и пятикратного растяжения изображения по оси X;
- 14) ручка « $\rightarrow$ » для перемещения луча по горизонтали;
- 15) сдвоенный переключатель «Время/см» и «Длительность» для ступенчатой и плавной регулировки частоты генератора развертки;
- 16) ручка «Стабильность» для выбора режима работы генератора развертки (автоколебательный или ждущий).

*К устройству синхронизации относятся*

- 17) ручка переключателя вида синхронизации «От сети»  $\square$ ,  $\square$ , 1:1, 1:10 для установки соответственно синхронизации от сети, внутренней, внешней с делителем и без делителя напряжения;
- 18) ручка переключателя полярности синхронизации « $\pm$ ,  $\sim$ ,  $\pm$ ,  $\sim$ » для установки полярности запускающего развертку сигнала с внешней синхронизацией;

19) ручка «Уровень» для регулировки уровня (амплитуды) синхронизирующего сигнала развертки;

20) гнездо « $\leftrightarrow$ ».  $\square$ » для подачи внешнего сигнала синхронизации.

Перед началом работы с осциллографом С1-68 необходимо органы управления установить в следующие положения:

тумблер «Сеть» — выключено,

ручку «Яркость» — в среднее,

ручку «Фокус» — в среднее,

переключатель входа « $\sim$ ,  $\approx$ » — в положение « $\sim$ »; переключатель аттенюатора «V/cm, mV/cm» — в положение «2 mV/cm»;

ручку «Усиление» — в крайнее правое положение («Калибр»);

тумблер « $\times 10$ ,  $\times 1$ » — в « $\times 10$ »;

ручки « $\updownarrow$ » и « $\leftrightarrow$ » — в среднее;

ручку «Баланс» — в среднее;

тумблер «X,  $\times 1$ ,  $\times 0,2$ » — в « $\times 1$ »;

переключатель «Время/cm» — в положение «0,5 mS»;

ручку «Длительность» — в крайнее правое положение;

ручку «Стабильность» — в среднее положение;

ручку «Уровень» — в среднее положение;

переключатель вида полярности синхронизации « $\pm$ ,  $\approx$ ,  $\pm$ ,  $\sim$ » в положение « $\pm$ ,  $\sim$ »;

переключатель вида синхронизации «От сети,  $\square$ ,  $\square$ » — в « $\square$ ».

После этого следует тумблером «Сеть» включить прибор. При этом должна загореться сигнальная лампочка. Через 2—3 мин после включения необходимо установить луч в пределах рабочей части экрана, отрегулировать его яркость и фокус так, чтобы изображение луча было ярким и четким. Это производится соответственно ручками « $\leftrightarrow$ » и « $\updownarrow$ », «Яркость» и «Фокус».

После прогрева прибора в течение 15 мин следует сбалансировать усилитель вертикального отклонения луча. Для этого необходимо:

1) установить тумблер « $\times 10$ ,  $\times 1$ » в положение « $\times 10$ » и, вращая ручку « $\updownarrow$ », расположить луч в центре экрана;

2) переключить тумблер « $\times 10$ ,  $\times 1$ » в положение « $\times 1$ » и ручкой «Баланс» снова установить луч в центре экрана.




Эти операции необходимо производить до тех пор, пока луч не будет перемещаться по экрану при переключениях тумблера « $\times 10$ ,  $\times 1$ ». С этого момента электронный осциллограф готов для наблюдений на его экране исследуемых сигналов.

### Порядок работы

Для наблюдения исследуемого сигнала необходимо соблюдать следующий порядок действий:

1. Выбрать тип развертки — автоколебательный или ждущий режим. Ждущий режим развертки применяется при исследованиях непериодических сигналов, импульсов с большим отношением длительности импульса к паузе и крутыми фронтами. Исследования подобных сигналов являются специфической областью измерения и в лаборатории основ промышленной электроники не производятся. Поэтому порядок работы в ждущем режиме здесь не рассматрива-

ется. Автоколебательный режим развертки применяется в подавляющем большинстве случаев. Для его установки ручку «Стабильность» необходимо повернуть вправо до тех пор, пока не появится яркая светящаяся горизонтальная линия.

2. Выбрать вид синхронизации. Как правило, обычно применяется внутренняя синхронизация. В этом режиме генератор пилообразных напряжений управляется синхронизирующими импульсами с частотой, равной или кратной частоте исследуемого сигнала, поступающего с выхода усилителя вертикального отклонения. Чтобы установить такой вид синхронизации, необходимо ручку переключателя вида синхронизации «От сети, , » установить в положение «».

3. Подать исследуемый сигнал с помощью коаксиального кабеля на гнездо « $\leftrightarrow$ ) 1 M  $\Omega$  50 pF». При этом следует выбрать характер входа с помощью переключателя входа « $\approx$ ,  $\sim$ ». Если исследуются периодические сигналы, то переключатель входа устанавливается в положение « $\sim$ ». Если же во входном сигнале присутствуют как переменная, так и постоянная составляющие, то переключатель входа ставят в положение « $\approx$ ». Для подавляющего большинства случаев может быть рекомендован вход типа « $\approx$ ».

4. Плавно поворачивая ручку «Уровень», добиться получения на экране устойчивого изображения. Если этого сделать не удастся, то следует немного поворачивать в обе стороны ручку «Стабильность», добиваясь устойчивого изображения.

5. Изменяя положение ручек переключателя «V/см, mV/см» и «Усиление», получить удобный для наблюдения размер изображения по вертикали.

6. Изменяя положение ручек переключателя «Длительность» и множителя развертки « $\times 1$ ,  $\times 0,2$ » получить удобный размер изображения по горизонтали.

## ОПИСАНИЕ УНИВЕРСАЛЬНОГО ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

Универсальный лабораторный стенд предназначен для выполнения лабораторных работ по курсу основ промышленной электроники. С помощью лабораторного стенда можно проводить исследования полупроводниковых и электровакуумных (электронных и ионных) приборов, а также электронных усилителей, генераторов, выпрямителей, интегральных схем и др. На передней панели стенда (рис. П.10) расположены два цифровых вольтметра, например типа Ф200 (5, 8), и два узкопрофильных амперметра (типа М-1830А) (6, 7). Под ними слева установлен генератор стандартных сигналов типа ГЗ-36 (3), а справа — осциллограф типа С1-68 (9), между которыми помещается испытательная панель лабораторной установки (4).

Для выполнения некоторых лабораторных работ применяется переносной универсальный вольтметр типа В7-15 (2).

Вся измерительная аппаратура и испытательная панель стенда являются съемными, что позволяет легко заменять приборы в случае их выхода из строя, а испытательную панель — при переходе от одной лабораторной работы к другой.

Питание стенда осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 В и частотой 50 Гц с помощью специального разъема, установленного в нижней части задней стенки стенда. Для получения

постоянного напряжения величиной 250 В или 12 В применяются стандартный блок питания Б5-10 и выпрямитель типа УБП-2, изготовленный опытным заводом МЭИ. Оба блока питания помещаются внутри левой тумбы стола (1).

Питание к съемной аппаратуре подводится с помощью ножевых разъемов типа РП14-16Л при вставлении ее в соответствующие пазы стенда до упора. На переднем щите рядом с каждым измерительным прибором (амперметром и вольтметром) располагаются переключатель рода работ и переключатель пределов измерений.

Исследуемые устройства и приборы располагаются на съемной испытательной панели (4). Каждая испытательная панель устанавливается и закрепляется на стенде с помощью ножевых разъемов РП14-16Л. К ответным частям этих разъемов, закрепленных в стен-

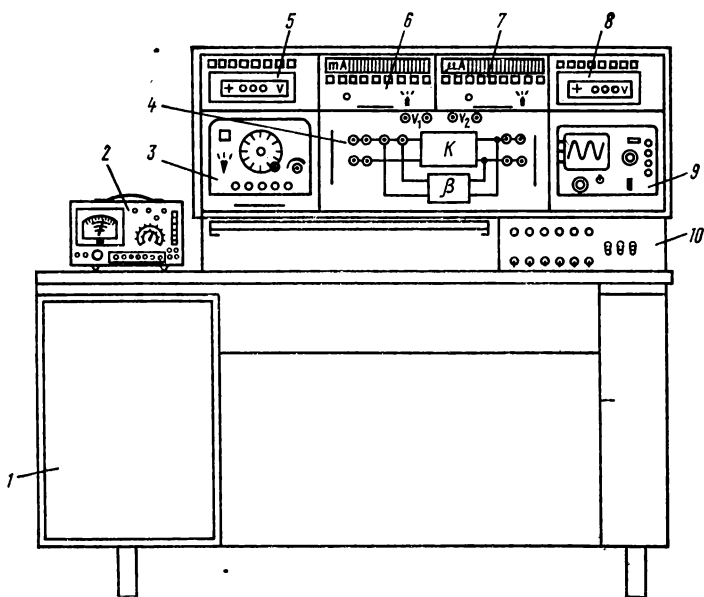


Рис. П.10. Внешний вид универсального лабораторного стенда

де, подведены все питающие напряжения. Входные (подводящие) зажимы амперметров и вольтметров, установленных в стенде, через те же разъемы РП14-16Л выводятся на испытательную панель. Подсоединение выходных зажимов генератора ГЗ-36, входных зажимов осциллографа С1-68 и гнезд измерительных приборов к испытательной панели производится «напрямую» специальными соединительными проводами со штырями. На испытательных панелях тех лабораторных работ, в которых требуется использовать характеристограф, установлены гнезда « $\rightarrow$ )X» и « $\rightarrow$ )1 M  $\Omega$  50 pF». Их следует соединять с помощью специального кабеля с соответствующими входами осциллографа С1-68.

Включение блоков питания и измерительных приборов производится тумблерами с общего щитка управления (10) в такой последовательности:

1) включается общее питание стенда и при этом подается напряжение сети на блоки питания, цифровые вольтметры, осциллограф С1-68, генератор ГЗ-36 и подсветку узкопрофильных амперметров;

2) включаются тумблеры, подключающие к испытательной панели питающие напряжения; в зависимости от необходимости подается постоянное регулируемое напряжение ( $U_-$ ), переменное (6,3 В, 15 В и 115 В) и 127 и 220 В;

3) включается характериограф (если это необходимо).

### УСТРОЙСТВО ДЛЯ СНЯТИЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫХ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ (ХАРАКТЕРИОГРАФ)

При выполнении лабораторных работ требуется снимать вольт-амперные характеристики полупроводниковых, электронных и ионных электровакуумных приборов. Для этого используется устройство, с помощью которого на экране электроннолучевой трубки наблю-

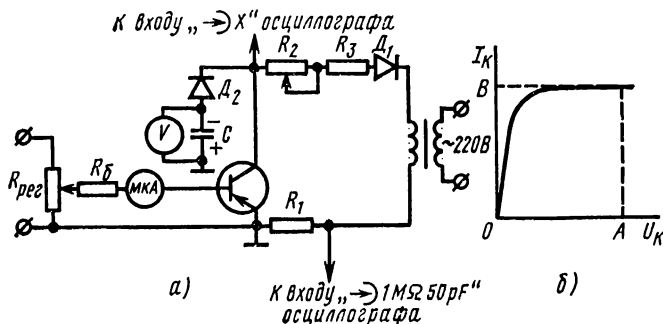


Рис. П.11. Схема подключения к характериографу транзистора для снятия выходной характеристики (а); выходная характеристика транзистора (б)

дают (фотографируют или срисовывают) вольт-амперную характеристику (а часто и семейство этих характеристик). Специальное устройство, предназначенное для этих целей, называется характериографом. При выполнении лабораторных работ в качестве характериографа используются осциллограф С1-68 и специальная приставка.

На рис. П.11, а изображена схема подключения транзистора к характериографу для снятия выходных характеристик.

Для наблюдения на экране электроннолучевой трубки (ЭЛТ) вольт-амперной характеристики  $I_K = f(U_K)$  необходимо, чтобы: 1) горизонтальное смещение луча ЭЛТ было пропорционально коллекторному напряжению транзистора; 2) вертикальное смещение луча ЭЛТ — величине коллекторного тока.

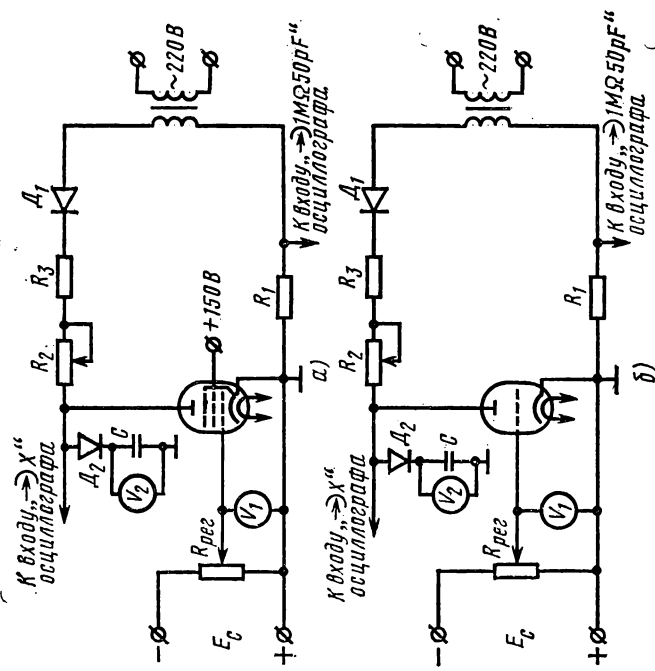


Рис. П.12. Схема подключения комбинированной лампы 6Ф1П к характеристикографу для снятия анодных характеристик (а) пентода и триода (б)

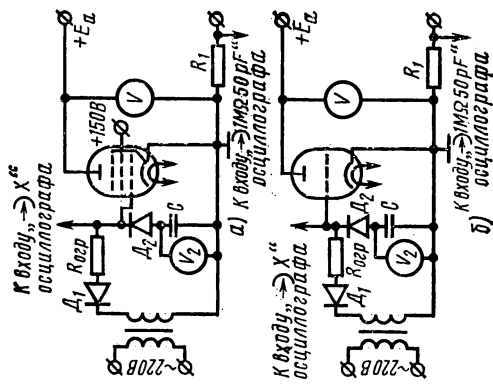


Рис. П.13. Схема подключения к характеристикографу комбинированной лампы 6Ф1П для снятия анодных сеточных характеристик пентода (а) и триода (б)

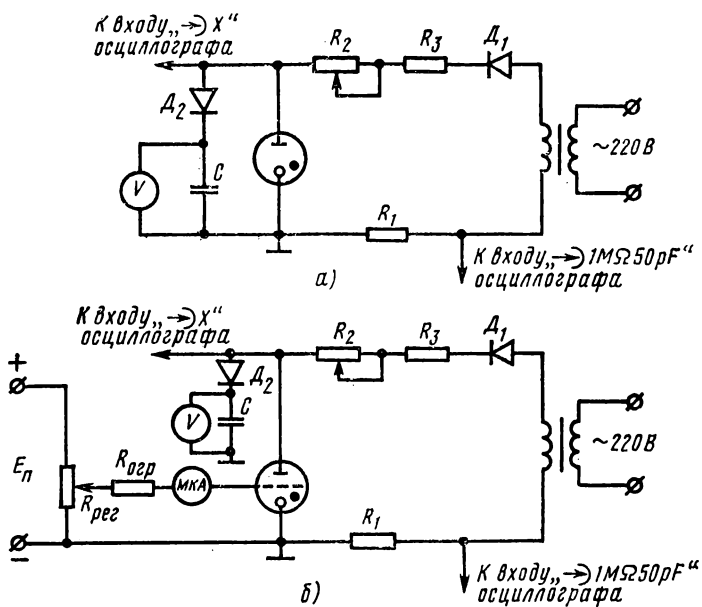


Рис. П.14. Схема подключения к характернографу газоразрядных приборов для снятия анодных характеристик стабилитрона (а) и тиратрона с холодным катодом (б)

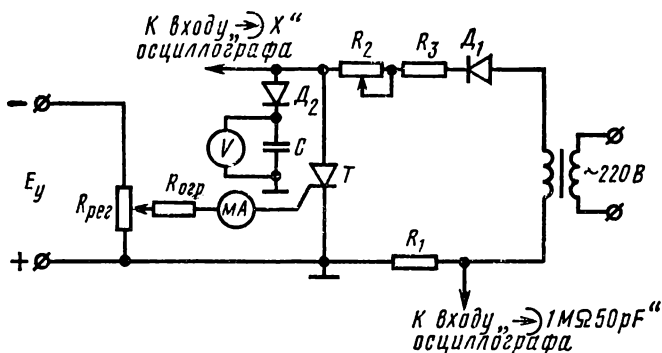


Рис. П.15. Схема подключения к характернографу тиристора для снятия вольт-амперных характеристик

С этой целью после однополупериодного выпрямления с помощью диода  $D_1$  питающее отрицательное пульсирующее напряжение подается в коллекторную цепь, коллекторное напряжение подается с помощью кабеля на гнездо «Х» осциллографа (горизонтальное отклонение луча). Резистором  $R_2$  регулируют величины коллекторных тока и напряжения, не превышая их допустимых величин. Резистор  $R_3$  ограничивает величину коллекторного тока при полностью выведенном резисторе  $R_2$ . Между коллектором и эмиттером включается цепь, состоящая из диода  $D_2$  и конденсатора  $C$ . Параллельно конденсатору подключается вольтметр, измеряющий амплитудное значение коллекторного напряжения. В паузы пульсирующего коллекторного напряжения диод  $D_2$  препятствует разряду конденсатора  $C$  через транзистор. Для получения напряжения, пропорционального коллекторному току, в коллекторную цепь включают резистор  $R_1$ . Создаваемое на нем падение напряжения подают с помощью кабеля на гнездо « $\rightarrow$ » 1 М  $\Omega$  50 pF» (усилитель вертикального отклонения луча). Сопротивление резистора  $R_1$  должно быть небольшим, чтобы его включение практически не влияло на величину коллекторного тока. Поэтому величину сопротивления  $R_1$  выбирают обычно равной 100 Ом. Устанавливая с помощью потенциометра  $R_{\text{рег}}$  необходимые значения базового тока  $I_b$  по микроамперметру, зарисовывают изображение кривой  $I_k = f(U_k)$ . При зарисовке осциллограмм с экрана осциллографа необходимо следить за тем, чтобы начало координат на экране ЭЛТ и на графике  $I_k = f(U_k)$  совпадали. Масштаб по оси тока (ось  $Y$ ) определяют с помощью осциллографа С1-68. Для этого сначала подают на вход осциллографа « $\rightarrow$ » 1 М  $\Omega$  50 pF» напряжение, снимаемое с резистора  $R_1$ . Затем устанавливают ручку «Усиление» осциллографа (см. рис. П.9) в крайнее правое положение. Манипулируя переключателем «V/cm, mV/cm», устанавливают размер изображения на экране (отрезок  $OA$  на рис. П.11, б) не менее 2 см. Далее, с помощью ручек « $\updownarrow$ » и « $\longleftrightarrow$ » осциллографа совмещают изображение сигнала с одним из делений шкалы на экране ЭЛТ и отсчитывают размер изображения по вертикали. Амплитуда напряжения, подаваемого на вход осциллографа (в вольтах), будет равна произведению цифровой отметки, на которой стоит переключатель «V/cm, mV/cm», на величину размера изображения (в сантиметрах). Масштаб по оси  $X$  (ось напряжений) определяется с помощью вольтметра, включенного через диод  $D_2$  между коллектором и корпусом. Тогда величина отрезка  $OB$  (рис. П.11, б) будет равна амплитудному значению коллекторного тока. Подключение других исследуемых приборов к характеристикографу производится по схемам, представленным на рис. П.12, П.13, П.14 и П.15. Определение масштабов по осям  $X$  и  $Y$  следует производить так же, как это излагалось на примере с выходными характеристиками транзистора.

При осциллографировании вольт-амперных характеристик необходимо следить за тем, чтобы значения токов и напряжений не выходили за границы предельно допустимых величин.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Аксенов В. П. и др. Основы применения электронных приборов. М., «Высшая школа», 1975.
2. Герасимов В. Г., Князьков О. М. Краснопольский А. Е. Основы промышленной электроники. М., «Высшая школа», 1968.
3. Герасимов В. Г., Князьков О. М. и др. Основы промышленной электроники (программированное учебное пособие). М., «Высшая школа», ч. I, 1969; ч. II, 1972.
4. Гершунский Б. С., Романовский А. В. и др. Справочник по основам электронной техники. Изд. Киевского университета, 1972.
5. Изъюрова Г. И., Кауфман М. С. Приборы и устройства промышленной электроники. М., «Высшая школа», 1975.
6. Кутвинов В. Г. Основы промышленной электроники. М., «Высшая школа», 1972.
7. Справочник по полупроводниковым диодам, транзисторам и интегральным схемам. Под общей редакцией Н. Н. Горюнова. М., «Энергия», 1972.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	3
Общие методические рекомендации по выполнению лабораторных работ . . . . .	4
Техника безопасности при проведении лабораторных работ . . . . .	7
Лабораторная работа 1. Исследование электронных электровакуумных приборов и усилителей . . . . .	9
Лабораторная работа 2. Исследование ионных приборов . . . . .	22
Лабораторная работа 3. Исследование транзисторов и транзисторных однокаскадных усилителей . . . . .	30
Лабораторная работа 4. Исследование многокаскадных транзисторных усилителей . . . . .	42
Лабораторная работа 5. Исследование усилителей постоянного тока . . . . .	49
Лабораторная работа 6. Исследование обратных связей в усилителях . . . . .	59
Лабораторная работа 7. Исследование усилителей мощности . . . . .	66
Лабораторная работа 8. Исследование неуправляемых и управляемых выпрямителей . . . . .	81
Лабораторная работа 9. Исследование автогенераторов синусоидальных колебаний . . . . .	98
Лабораторная работа 10. Исследование импульсных устройств и электронных реле . . . . .	108
Лабораторная работа 11. Исследование полупроводниковых приборов . . . . .	120
Лабораторная работа 12. Исследование фотоэлектронных приборов и устройств . . . . .	132
Лабораторная работа 13. Исследование гибридных интегральных микросхем . . . . .	141
Лабораторная работа 14. Исследование полупроводниковых интегральных микросхем . . . . .	151
Приложение . . . . .	163
Литература . . . . .	180

**ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ  
ПО ОСНОВАМ ПРОМЫШЛЕННОЙ  
ЭЛЕКТРОНИКИ**

**Под. ред. В. Г. Герасимова**

Редактор О. В. Долженко  
Переплет художника А. И. Шавард  
Художественный редактор Т. М. Скворцова  
Технический редактор Е. И. Герасимова -  
Корректор Г. И. Кострикова

ИБ № 712

Сдано в набор 10/II—77 г. Подп. к печати 28/VII—77 г.  
Формат 84×108<sup>1/32</sup> Бум. тип. № 3. Объем 5,75 печ. л.  
Усл. п. л. 9,66 Уч.-изд. л. 10,91 Изд. № ЭР—215  
Тираж 25 000 экз. Цена 30 коп.

План выпуска литературы для вузов и техникумов  
издательства «Высшая школа» на 1977 г. Позиция № 115

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. Зак. 2222

30 коп.

ИЗДАТЕЛЬСТВО  
МОСКВА  
1977 ГОД  
ВЫСШАЯ ШКОЛА

