

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

**по основам
промышленной
электроники**



ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО ОСНОВАМ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ,
ПЕРЕРАБОТАННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ

Под редакцией В. Г. Герасимова



МОСКВА «ВЫСШАЯ ШКОЛА» 1989

ББК 32.85

Л12

УДК 621.38

Рецензент — кафедра общей и специальной электротехники
Университета дружбы народов им. П. Лумумбы (зав. кафедрой — д-р
техн. наук, проф. Л. М. Саликов)

О. М. Князьков, А. Е. Краснопольский, П. С. Культиасов, А. Д. По-
кровский, Л. А. Чернов

Лабораторные работы по основам промышленной эле-
Л12 **ктроники: Учеб. пособие для неэлектротехн. спец. вузов/**
О. М. Князьков, А. Е. Краснопольский, П. С. Культиасов
и др.; Под ред. В. Г. Герасимова. — 2-е изд., перераб. и
доп. — М.: Высш. шк., 1989. — 175 с.: ил.

ISBN 5-06-000109-1

Пособие соответствует программе по электротехническим дисциплинам для
неэлектротехнических специальностей высших учебных заведений.

Во втором издании исключены лабораторные работы по электровакуумным
электронным и ионным приборам. Акцент сделан на изучение современных полу-
проводниковых приборов, аналоговых и цифровых интегральных микросхем, опто-
нов, микропроцессоров и т. д.

Пособие содержит необходимые учебные материалы для подготовки и вы-
полнения лабораторных работ, а также вопросы для самоконтроля.

Л 2202070500(4309000000)—393 167—89
001(01)—89

ББК 32.85

6Ф0.3

ISBN 5-06-000109-1

© Издательство «Высшая школа», 1977

© Издательство «Высшая школа», 1989,
с изменениями

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящее время в программы электротехнических дисциплин большинства неэлектротехнических специальностей вузов включен раздел «Основы электроники», изучение которого предполагает выполнение студентами нескольких лабораторных работ. Количество лабораторных занятий по этому разделу зависит от специальности. Для большинства специальностей студенты выполняют 3—5 лабораторных работ по электронике, а для специальностей, связанных с автоматизацией различных отраслей народного хозяйства, их может быть 7—8.

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

В предлагаемом учебном пособии приведено описание 11 лабораторных работ по основам промышленной электроники. Лабораторные работы составлены на основе опыта преподавания дисциплины «Электротехника и электроника» в Московском энергетическом институте. Количество и перечень лабораторных работ, выполняемых студентами, должны определяться кафедрами в зависимости от специальности будущих инженеров.

Авторы надеются, что предлагаемое учебное пособие окажется полезным не только студентам, но и преподавателям, ведущим занятия по электронике, и окажет помощь при постановке лабораторных работ по электронике в вузах страны. Авторы благодарят рецензентов, а также преподавателей и сотрудников кафедры электротехники и интроскопии МЭИ, особенно доц. М. С. Цепляеву и ст. преподавателя О. В. Николаеву, за ценные замечания и советы.

Материал книги распределен между авторами следующим образом: общие методические рекомендации по выполнению

лабораторных работ, техника безопасности при проведении лабораторных работ, лабораторные работы № 1—4, 6 и Приложение 1, 3 написаны О. М. Князьковым, лабораторные работы № 7, 11, Приложение 2 — А. Е. Краснопольским, лабораторные работы № 8, 9 — П. С. Культиасовым, лабораторная работа № 5 — Л. А. Черновым, лабораторная работа № 10 — А. Д. Покровским.

Авторы понимают, что подготовленное учебное пособие не лишено недостатков, поэтому с благодарностью примут все замечания и пожелания по его улучшению, которые просят направлять по адресу: 101430, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., д. 29/14, издательство «Высшая школа».

Редактор

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Промышленной электроникой называется отрасль науки и техники, связанная с изучением принципа действия, характеристик электровакуумных и полупроводниковых приборов, использованием их в промышленных устройствах и системах. В зависимости от области применения этих устройств промышленную электронику подразделяют на информационную, энергетическую и технологическую.

В *информационной промышленной электронике* основное внимание уделяется получению, передаче, преобразованию, хранению и использованию информации о производственных процессах с целью осуществления контроля и управления. *Энергетическая промышленная электроника* связана с получением, передачей, преобразованием и потреблением электрической энергии. *Технологическая промышленная электроника* охватывает круг вопросов, связанных с воздействием пучков электронов, ионов и квантов электромагнитного поля на вещество. Все три направления промышленной электроники имеют важное значение для различных областей промышленности, автоматизации производственных процессов.

Изучение промышленной электроники эффективно лишь тогда, когда наряду с овладением теорией студенты в условиях проведения лабораторного эксперимента знакомятся на практике с основными характеристиками электронных устройств. Данный лабораторный практикум содержит работы, связанные в основном с первыми двумя направлениями промышленной электроники, имеющими отношение к большинству неэлектротехнических специальностей.

В ходе выполнения лабораторных работ студенты должны: научиться читать схемы наиболее распространенных электронных устройств, различать условные обозначения полупроводниковых приборов, интегральных линейных и цифровых микросхем и оптоэлектронных приборов;

ознакомиться с устройством и внешним видом полупроводниковых и оптоэлектронных приборов, интегральных микросхем и некоторых измерительных электронных приборов;

понять принцип действия основных электронных устройств:

выпрямителей, усилителей, автогенераторов, логических элементов, триггеров, регистров, дешифраторов, АЦП, ЦАП и микропроцессоров;

приобрести навыки определения характеристик и параметров основных электронных устройств;

получить представление о возможностях использования тех или иных полупроводниковых приборов, интегральных микросхем и оптоэлектронных приборов при решении определенных практических задач.

Учебное пособие составлено применительно к лаборатории основ промышленной электроники МЭИ, 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. Преимущество фронтального метода состоит в том, что лабораторные работы выполняются после соответствующих лекций всеми студентами одновременно.

Количество и перечень лабораторных работ, которые выполняются студентами в зависимости от их специальности, зафиксированы в графиках проведения лабораторных занятий.

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

Подготовка к лабораторной работе предусматривает изучение теоретического материала, а также выполнение расчетной части задания. Задание включает расчет параметров и режимов работы электронных устройств, 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.

При сборке электронных цепей рекомендуется вначале включать элементы цепи с последовательным соединением, а затем осуществлять подключение параллельных ветвей. Соединительные провода к вольтметру и осциллографу включаются в последнюю очередь. При этом провод, соединенный с корпусом измерительного прибора, должен обязательно включаться в одно из гнезд, имеющих потенциал корпуса стенда (обозначено знаком \perp).

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 иметь 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 лабораторных 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 предусмотрены 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 во избежание 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 номинальных значений электрических величин для большинства лабораторных работ крайне необходимо. Полупроводниковые приборы и микросхемы характеризуются рядом максимально допустимых параметров, превышение которых при проведении эксперимента недопустимо.

При построении некоторых характеристик, например амплитудно-частотной, пользуются логарифмической шкалой для частот, откладываемых по оси абсцисс. При этом измерения, проводимые в широком диапазоне частот, следует осуществлять на частотах, кратных 1, 2 и 5, т. е. при $f=20; 50; 100; 200; 500; 1000$ Гц и т. д.

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

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

На лабораторном стенде имеются разъемы, клеммы, электрические 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. Перед началом работы на стенде необходимо убедиться, что все выключатели стенда находятся в положении «Выключено».

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

4. Категорически запрещается включать стенд без разрешения преподавателя.

5. При проведении опытов на испытательной панели стенда, находящейся под напряжением, все переключения, регулировки с помощью переключателей и переменных резисторов, включение и выключение тумблеров и другие подобные операции должны производиться одним человеком и только одной рукой. Вторая рука должна быть свободной и не должна касаться аппаратуры стенда. Недопустимо прикасаться к лишенным изоляции элементам цепей, находящимся под напряжением.

6. На испытательной панели стенда, находящейся под напряжением, запрещается производить какие-либо переключения с помощью соединительных проводов. Перед любым изменением исследуемой цепи испытательная панель должна быть обесто-

чена. Для этого соответствующие выключатели должны быть поставлены в положение «Выключено».

7. При проведении опытов с использованием электронных приборов (генератора, осциллографа, электронного вольтметра и т. д.) необходимо остерегаться одновременного касания руками, карандашами и другими предметами испытательной панели, находящейся под напряжением, и корпуса прибора, соединенного с клеммой \perp . При использовании нескольких электронных устройств одновременно корпуса приборов следует соединить между собой проводами с помощью этих клемм.

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

9. В случае поражения человека электрическим током следует немедленно обесточить стенд, выключив его питание. Если 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.

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

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

Исследование источников вторичного электропитания

Цель работы. Изучение принципа работы и исследование характеристик неуправляемых и управляемых источников вторичного электропитания (ИВЭ), а также стабилизаторов на дискретных элементах и с использованием интегральных микросхем.

Краткие теоретические сведения

Питание электронных устройств осуществляется с помощью источников вторичного электропитания (ИВЭ).

Наиболее распространенным ИВЭ является устройство, преобразующее переменное напряжение в постоянное. Такой ИВЭ (рис. 1.1) состоит из выпрямителя, в который входят силовой трансформатор Tr , диод или совокупность диодов D , сглаживающий фильтр $СФ$, и стабилизатора $Ст$. После изменения напряжения сети u_c до необходимого значения с помощью трансфор-

матора Tr диодами D выпрямляют переменное напряжение. Сглаживающий фильтр CF уменьшает пульсации выпрямленного напряжения до требуемого значения. Установленный после сглаживающего фильтра стабилизатор St поддерживает неизменным напряжение на нагрузочном устройстве или резисторе с сопротивлением R_H при изменениях напряжения сети или сопротивления R_H .

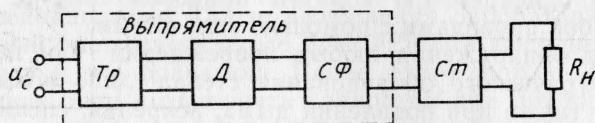


Рис. 1.1. Структурная схема источника вторичного электропитания

В зависимости от условий работы и требований, предъявляемых к выпрямителям, отдельные узлы их могут отсутствовать. Например, если напряжение сети соответствует требуемому значению выпрямленного напряжения, то можно не использовать трансформатор. В трехфазных выпрямителях могут отсутствовать сглаживающие фильтры, так как пульсации в них сравнительно небольшие. В некоторых случаях может отсутствовать стабилизатор.

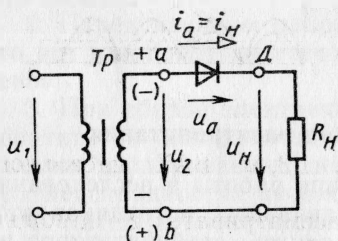


Рис. 1.2. Схема однополупериодного выпрямителя

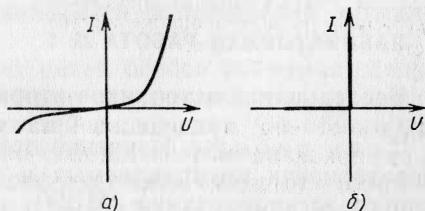


Рис. 1.3. Вольт-амперные характеристики реального (а) и идеального (б) диодов

Однофазные неуправляемые выпрямители. Для выпрямления переменного напряжения однофазных цепей широко применяют два типа однофазных выпрямителей: однополупериодный и двухполупериодный.

Схема однополупериодного выпрямителя с трансформатором приведена на рис. 1.2. Диод D включен последовательно с нагрузочным устройством (резистором) R_H и вторичной обмоткой трансформатора Tr .

Анализ работы выпрямителей проводят при допущении, что диод идеален. Это означает, что:

- 1) сопротивление диода в прямом направлении равно нулю;
- 2) обратное сопротивление диода бесконечно велико.

В настоящее время в выпрямителях используются полупроводниковые диоды, вольт-амперная характеристика (ВАХ) кото-

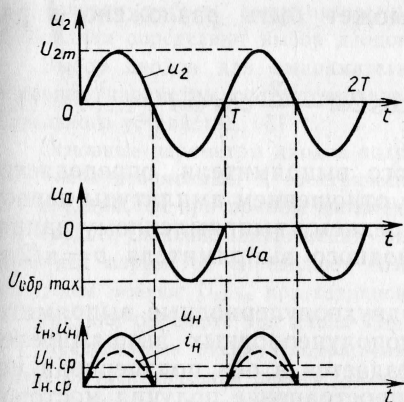


Рис. 1.4. Временные диаграммы токов и напряжений однополупериодного выпрямителя

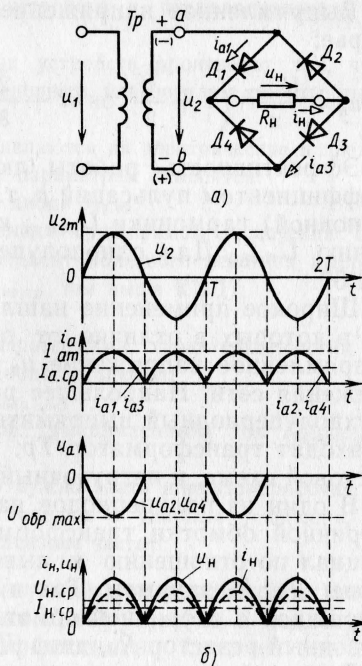


Рис. 1.5. Схема (а) и временные диаграммы токов и напряжений (б) мостового выпрямителя

рых имеет вид, приведенный на рис. 1.3, а. ВАХ идеального диода показана на рис. 1.3, б.

Работу выпрямителей удобно рассматривать с помощью временных диаграмм. На рис. 1.4 изображена временная диаграмма однополупериодного выпрямителя. В течение первого полупериода напряжения u_2 , когда потенциал точки a положителен по отношению к потенциалу точки b , диод открыт и в нагрузочном резисторе появляется ток. Если считать, что сопротивление диода в прямом направлении равно нулю, то все напряжение будет приложено к нагрузочному резистору, т. е. $u_H = u_2$. Во второй полупериод полярность напряжения u_2 на вторичной обмотке трансформатора изменяется на противоположную, т. е. потенциал точки a становится отрицательным по отношению к потенциалу точки b . При такой полярности диод включен в обратном направлении. Если считать, что сопротивление закрытого диода равно бесконечности, то все напряжение

u_2 вторичной обмотки трансформатора будет приложено к закрытому диоду, т. е. $u_a = u_2$, и его максимальное значение $U_{\text{обр max}} = \sqrt{2}U_2$.

Из временных диаграмм видно, что ток i_n в нагрузочном резисторе и напряжение u_n на нем имеют пульсирующий характер и значительно отличаются от постоянных.

Выпрямленное напряжение может быть разложено в ряд Фурье:

$$u_n = \frac{U_{\text{max}}}{\pi} \left(1 + \frac{\pi}{2} \cos \omega t + \frac{2}{3} \cos 2\omega t - \frac{2}{15} \cos 4\omega t + \dots \right). \quad (1.1)$$

Эффективность работы любого выпрямителя определяется коэффициентом пульсаций p , т. е. отношением амплитуды первой (основной) гармоники $U_{\text{осн m}}$ к среднему выпрямленному напряжению $U_{\text{н.ср}}$. Для однополупериодного выпрямителя $p = \pi/2 \approx 1,57$.

Широкое применение нашли двухполупериодные выпрямители, в которых в отличие от однополупериодных выпрямителей выпрямленное напряжение u_n создается в оба полупериода напряжения сети. Наибольшее распространение получил мостовой двухполупериодный выпрямитель (рис. 1.5, а), в состав которого входят трансформатор Tr , диоды D_1-D_4 , включенные по мостовой схеме, и нагрузочный резистор R_n .

В один из полупериодов напряжения сети u_c , когда вывод а вторичной обмотки трансформатора имеет положительный потенциал по отношению к выводу b , диоды D_1, D_3 открыты, а диоды D_2, D_4 закрыты. Ток в этот полупериод имеет направление: вывод а вторичной обмотки трансформатора, диод D_1 , нагрузочный резистор R_n , диод D_3 и вывод b .

В другой полупериод, когда вывод а имеет отрицательный потенциал по отношению к выводу b , диоды D_1, D_3 закрыты, а диоды D_2, D_4 открыты, ток имеет направление от вывода b через диод D_4 , нагрузочный резистор R_n , диод D_2 к выводу а вторичной обмотки трансформатора. При этом в течение всего периода ток i_n в нагрузочном резисторе R_n и напряжение u_n на нем имеют одно и то же направление (рис. 1.5, б). Ряд Фурье такой кривой имеет вид

$$u_n = \frac{2U_{\text{max}}}{\pi} \left(1 + \frac{2}{3} \cos 2\omega t - \frac{2}{15} \cos 4\omega t + \dots \right). \quad (1.2)$$

Коэффициент пульсаций $p = U_{\text{осн m}}/U_{\text{н.ср}} = 2/3 \approx 0,67$.

Основными показателями работы выпрямителей являются:

среднее значение напряжения на нагрузочном устройстве (резисторе)

$U_{\text{н.ср}}$;

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

максимальное обратное напряжение на запертом диоде $U_{\text{обр max}}$;

максимальные выпрямленные ток $I_{н\max}$ и напряжение $U_{н\max}$;
коэффициент пульсаций $p = U_{осн\ m} / U_{н.ср}$;
условия эксплуатации (диапазон изменения температуры окружающей среды, влажность, вибрации и т. д.);

КПД выпрямителя;

габариты и масса выпрямителя.

Условия работы выпрямительных устройств и предъявляемые к ним требования определяют выбор диодов.

Выбор диодов для выпрямительных устройств производят так, чтобы основные параметры соответствовали основным показателям работы выпрямительного устройства.

Основные параметры диодов подразделяются на электрические и предельные эксплуатационные. 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 КПД);

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

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

допустимое обратное напряжение $U_{обр.доп}$;

допустимый (максимальный) прямой (выпрямленный) ток $I_{пр.доп}$ (или $I_{выпр\ max}$).

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

Сравнение двух типов выпрямителей при одинаковых значениях U_2 и R_n позволяет выявить их преимущества и недостатки. Мостовой выпрямитель более эффективен: среднее значение выпрямленного тока и напряжения у него в два раза больше, а пульсации значительно меньше, чем у однополупериодного выпрямителя. Недостатком мостового выпрямителя является применение четырех диодов.

В настоящее время в мостовых выпрямителях часто применяют кремниевые диффузионные блоки КЦ402—КЦ405 (от А до И), которые рассчитаны на токи $I_{пр.ср}$ от 0,6 до 1 А и напряжения $U_{обр.доп}$ от 100 до 600 В. Они выпускаются в пластмассовом корпусе с размерами, не превышающими нескольких сантиметров, и массой от 7 до 20 г.

Сглаживающие фильтры. Коэффициент пульсаций напряжения, питающего электронные устройства, должен составлять доли процента, поэтому пульсации стремятся уменьшить до заданного уровня с помощью устройств, называемых сглаживающими фильтрами.

В зависимости от типа фильтрующего элемента различают индуктивные, емкостные и электронные (транзисторные) фильтры. Их основными элементами являются соответственно индук-

тивные катушки, конденсаторы и транзисторы, сопротивления которых различны для постоянного и переменного токов.

Для индуктивных катушек сопротивление постоянному току мало, а индуктивное сопротивление переменному току $X_L = L\omega$ увеличивается с ростом частоты. Таким образом, для переменной составляющей тока индуктивное сопротивление катушки значительно больше сопротивления постоянной составляющей. Поэтому при включении индуктивной катушки (индуктивный

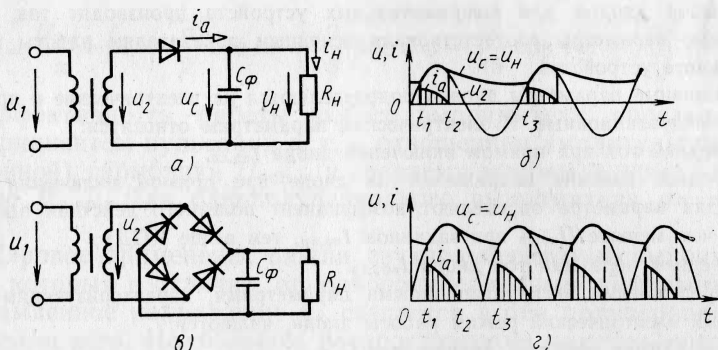


Рис. 1.6. Схемы (а, в) и временные диаграммы токов и напряжений (б, г) однополупериодного и мостового выпрямителей с емкостным фильтром

фильтр) последовательно с нагрузочным устройством падение напряжения на нагрузочном устройстве от переменной составляющей тока снижается, т. е. пульсации выпрямленного напряжения уменьшаются.

Основным параметром, характеризующим эффективность действия сглаживающего фильтра, является коэффициент сглаживания, равный отношению коэффициентов пульсаций на входе и выходе фильтра:

$$q = p_{\text{вх}} / p_{\text{вых}}. \quad (1.3)$$

Емкостный фильтр C_Φ включают параллельно нагрузочному резистору R_H (рис. 1.6, а). При таком включении конденсатор C_Φ заряжается через диод до амплитудного значения напряжения u_2 в моменты времени, когда напряжение u_2 на вторичной обмотке трансформатора превышает напряжение u_C на конденсаторе (рис. 1.6, б). Этому режиму соответствует интервал времени $t_1 - t_2$. В течение интервала времени $t_2 - t_3$ напряжение $u_C > u_2$, диод закрыт, а конденсатор разряжается через нагрузочный резистор R_H с постоянной времени $\tau_{\text{разр}} = C_\Phi R_H$. При этом напряжение u_H снижается до некоторого наименьшего значения по экспоненциальному закону. Начиная с момента времени t_3 напряжение u_C на конденсаторе становится меньше напряжения u_2 . Диод открывается, конденсатор C_Φ снова начинает

заряжаться, и процессы повторяются. Как показывают временные диаграммы рис. 1.6, б, при включении емкостного фильтра напряжение u_H не уменьшается до нуля во вторую половину периода, а пульсирует в некоторых пределах, увеличивая среднее значение выпрямленного напряжения по сравнению с однополупериодным выпрямителем без фильтра. Отметим, что при этом к закрытому диоду приложено напряжение $U_{обр\ max}$, значение которого может приближаться к удвоенному значению

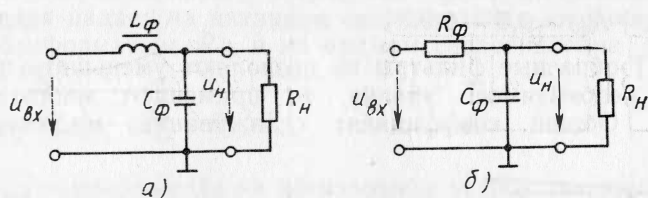


Рис. 1.7. Схемы Г-образных фильтров LC-типа (а) и RC-типа (б)

U_{2m} . Аналогично работает емкостный фильтр в мостовом выпрямителе (рис. 1.6, в, г).

Емкость конденсатора C_Φ выбирают такой, чтобы выполнялось соотношение

$$\tau_{разр} = C_\Phi R_H \gg T \quad (\tau_{разр} \approx 5T), \quad (1.4)$$

где $T = 1/f_{осн}$ — период основной гармоники.

Коэффициент пульсаций выпрямителя с емкостным фильтром может уменьшаться до 10^{-2} . Емкостный фильтр целесообразно применять с высокоомным нагрузочным резистором R_H при мощности P_H не более нескольких десятков ватт.

Если требуется более высокий коэффициент сглаживания, то прибегают к сложным сглаживающим фильтрам. К ним относятся Г-образные фильтры LC- и RC-типов.

Подключение индуктивной катушки L_Φ к емкостному фильтру C_Φ (рис. 1.7, а) приводит к тому, что за счет падения напряжения на индуктивной катушке L_Φ значительно уменьшается доля переменной составляющей выпрямленного напряжения. Падения напряжения от постоянной составляющей тока практически нет, так как активное сопротивление индуктивной катушки стремятся делать очень малым.

В маломощных выпрямительных устройствах, когда требуется значительно уменьшить массу, габариты и стоимость фильтра, вместо индуктивной катушки обычно включают резистор R_Φ (рис. 1.7, б). «Фильтрующее» действие резистора R_Φ заключается в том, что при $X_{C_\Phi} \ll R_H$ на R_Φ происходит большее падение переменной составляющей выпрямленного напряжения, чем постоянной.

Можно показать, что коэффициент сглаживания RC -фильтра приближенно определяется по формуле

$$q = \frac{P_{\text{вх}}}{P_{\text{вых}}} = \frac{U_{\text{осн.т.вх}}/U_{\text{н.ср.вх}}}{U_{\text{осн.т.вых}}/U_{\text{н.ср.вых}}} \approx \frac{\sqrt{R_{\text{ф}}^2 + X_{\text{сф}}^2}}{X_{\text{сф}}} \frac{R_{\text{н}}}{R_{\text{н}} + R_{\text{ф}}}. \quad (1.5)$$

Чтобы уменьшение постоянной составляющей выпрямленного напряжения было не очень большим, значения $R_{\text{н}}$ и $R_{\text{ф}}$ выбирают соизмеримыми, т. е.

$$R_{\text{н}}/(R_{\text{н}} + R_{\text{ф}}) = 0,5 \div 0,9. \quad (1.6)$$

Если Γ -образные фильтры не позволяют уменьшить пульсации до необходимого уровня, то применяют многосвязные фильтры. Общий коэффициент сглаживания многосвязного

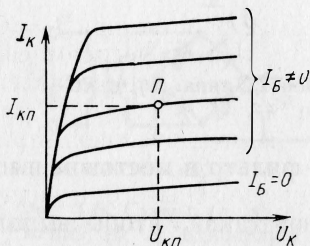


Рис. 1.8. Выбор рабочей точки транзистора в электронном фильтре

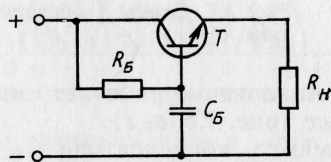


Рис. 1.9. Схема простейшего электронного фильтра

фильтра равен произведению коэффициентов сглаживания фильтров, из которых он состоит.

В последнее время все чаще начали применять электронные фильтры, в которых вместо индуктивных катушек включают транзисторы.

Применение транзисторов в фильтрах основано на различии их сопротивлений для постоянной и переменной составляющих коллекторного тока. При выборе рабочей точки Π на пологом участке выходной характеристики (рис. 1.8) сопротивление промежутка коллектор—эмиттер постоянному току (статическое сопротивление) $R_{\text{ст}} = U_{\text{КП}}/I_{\text{КП}}$ на два-три порядка меньше сопротивления этого промежутка переменному току $\Delta U_{\text{К}}/\Delta I_{\text{К}}$ (динамического сопротивления). Электронные фильтры снижают пульсации примерно в 3—5 раз.

На рис. 1.9 изображена схема простейшего электронного фильтра, в котором транзистор включен последовательно с нагрузочным резистором $R_{\text{н}}$. В этом фильтре для обеспечения положения рабочей точки на пологом (рабочем) участке выходной характеристики в базовую цепь включается RC -цепь, постоянная времени которой $\tau_{\text{б}} = R_{\text{б}}C_{\text{б}}$ должна быть много больше

периода основной гармоники выпрямленного напряжения: $R_{Б}C_{Б} \gg T_{осн}$. Нагрузочный резистор R_n включен в эмиттерную цепь, что позволяет получить низкое выходное сопротивление выпрямителя с фильтром. Следовательно, электронные фильтры мало чувствительны к изменениям тока I_n , температуры и коэффициента усиления транзистора, в связи с чем они получили в последнее время широкое распространение.

Внешние характеристики выпрямительных устройств. При работе выпрямительного устройства часть выпрямленного напряжения падает на активном сопротивлении вторичной обмотки трансформатора $R_{тр}$ и на прямом сопротивлении открытого диода $R_{пр}$, т. е.

$$U_n = U_{н.х} - (R_{тр} + R_{пр}) I_n, \quad (1.7)$$

где $U_{н.х}$ — напряжение на нагрузочном устройстве при $I_n = 0$.

Из выражения (1.7) видно, что с ростом выпрямленного тока I_n увеличивается падение напряжения на сопротивлениях $R_{тр}$, $R_{пр}$, а напряжение на нагрузочном устройстве U_n уменьшается. Зависимость $U_n = f(I_n)$, называемая внешней характеристикой, является одной из важнейших характеристик выпрямительного устройства. Сопротивление открытого диода $R_{пр}$ зависит от тока, поэтому зависимость $U_n = f(I_n)$ нелинейна (кривая 1 на рис. 1.10). Если в выпрямительное устройство включен фильтр, то зависимость $U_n = f(I_n)$ изменяется. Кривая 2 соответствует электронному транзисторному фильтру. Она идет круче, так как добавляется падение напряжения на транзисторе. Емкостному фильтру соответствует кривая 3, а Г-образному RC-фильтру — кривая 4.

В режиме холостого хода ($I_n = 0$) при включении как емкостного, так и Г-образного RC-фильтра выпрямленное напряжение $U_n = U_{н.мах}$. Это обусловлено тем, что конденсатор C_f заряжается до амплитудного значения выпрямленного напряжения $U_{н.мах}$. Уменьшение напряжения U_n выпрямителя с емкостным фильтром происходит более резко, чем без него. Это объясняется тем, что с увеличением тока I_n помимо причины, по которой уменьшалось напряжение U_n в выпрямителе без фильтра, накладывается снижение напряжения U_n , вызванное уменьшением постоянной времени разрядки конденсатора C_f из-за уменьшения сопротивления R_n .

Выпрямленное напряжение при холостом ходе выпрямителя с Г-образным фильтром такое же, как у выпрямителя с емкостным фильтром, т. е. равно $U_{н.мах}$, однако наклон внешней характеристики выпрямителя с Г-образным фильтром больше за счет падения напряжения на резисторе R_f .

Стабилизаторы напряжения. Вследствие изменений напряжения сети и сопротивления нагрузочного устройства выпрямленное напряжение на нем может изменяться.

Современная электронная аппаратура может нормально функционировать при нестабильности питающего напряжения 0,1—3%, а для отдельных функциональных узлов еще меньше.

Стабилизация осуществляется с помощью устройства, называемого стабилизатором, которое включают между фильтром и нагрузочным устройством. Стабилизатором напряжения (тока) называют устройство, автоматически обеспечивающее поддержание напряжения (тока) нагрузочного устройства с заданной степенью точности.

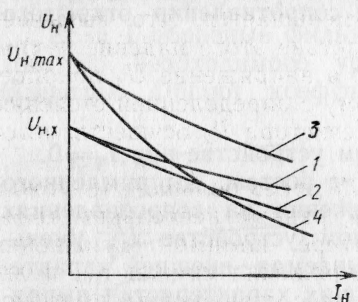


Рис. 1.10. Внешние характеристики выпрямителя

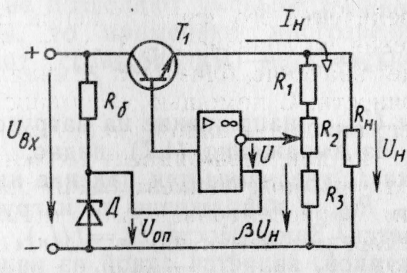


Рис. 1.11. Схема компенсационного стабилизатора напряжения с использованием ОУ

Основным параметром, характеризующим качество работы всех стабилизаторов, является коэффициент стабилизации. Для стабилизаторов напряжения коэффициент стабилизации

$$K_{стU} = \frac{\Delta U_{вх}/U_{вх}}{\Delta U_{вых}/U_{вых}}, \quad (1.8)$$

где $\Delta U_{вх}$, $\Delta U_{вых}$ — приращения входного и выходного напряжений; $U_{вх}$, $U_{вых}$ — номинальные значения входного и выходного напряжений.

Стабилизаторы постоянного напряжения бывают параметрическими и компенсационными. Наиболее простым является параметрический стабилизатор, использующий участок ВАХ полупроводниковых стабилитронов, на котором напряжение стабилитрона изменяется очень мало.

В лабораторной работе исследуется компенсационный стабилизатор, схема которого изображена на рис. 1.11. В компенсационном стабилизаторе происходит непрерывное сравнение напряжения на нагрузочном резисторе U_H (или его части) с опорным напряжением $U_{оп}$, создаваемым параметрическим стабилизатором, собранным на стабилитроне D .

При увеличении входного напряжения $U_{вх}$ стабилизатора или уменьшении нагрузочного тока I_H напряжение U_H повы-

шается, отклоняясь от номинального значения. Часть напряжения U_n , равная βU_n (β — коэффициент обратной связи, равный коэффициенту деления резистивного делителя $R_1 R_2 R_3$), являющаяся сигналом обратной связи, сравнивается с опорным напряжением $U_{оп}$, снимаемым с параметрического стабилизатора. Поскольку опорное напряжение остается практически постоянным, напряжение U между инвертирующим и неинвертирующим входами ОУ из-за увеличения напряжения βU_n возрастает ($U = \beta U_n - U_{оп}$). При этом уменьшается выходное напряжение инвертирующего ОУ. Это приводит к тому, что потенциал базы транзистора T_1 типа $n-p-n$ также уменьшается, что вызывает увеличение его сопротивления. Вследствие этого падение напряжения на транзисторе T_1 возрастает, а напряжение U_n приобретает значение, близкое к номинальному с определенной степенью точности. С помощью переменного резистора R_2 осуществляется регулирование напряжения βU_n .

Так как коэффициент усиления ОУ очень большой, то можно получить коэффициент стабилизации, равный нескольким тысячам. В рассматриваемом стабилизаторе помимо уменьшения медленных изменений выходного напряжения снижаются пульсации за счет уменьшения переменных составляющих выходного напряжения. При изменениях тока I_n напряжение $U_n = U_{вых}$ также будет стабилизироваться. Коэффициент стабилизации в этом случае определяется по формуле

$$K_{стU} = \frac{\Delta I_n / I_n}{\Delta U_{вых} / U_{вых}}. \quad (1.8a)$$

Одной из основных характеристик компенсационного стабилизатора являются зависимости $U_{вых} = f(U_{вх})$ и $U_{вых} = f(I_n)$. Последняя приведена на рис. 1.12. Рабочим участком характеристики является горизонтальный участок ab , т. е. в диапазоне $I_{n\min} - I_{n\max}$ стабилизатор стабилизирует выходное напряжение. За пределами участка ab нормальный режим работы стабилизатора нарушается и он перестает стабилизировать. Угол наклона рабочего участка характеристики к оси абсцисс определяет коэффициент стабилизации стабилизатора.

Управляемые выпрямители. Довольно часто в различных устройствах требуется регулирование выпрямленного напряжения. Такие устройства получили название управляемых выпрямителей. В них в качестве управляемых вентилях (ключей) применяются т р и с т о р ы. Условное графическое обозначение тиристора показано на рис. 1.13, $a, б$. Тиристор отличается от диода тем, что кроме основных выводов 1 и 2 имеет управляющий электрод 3.

Так же как и диод, тиристор обладает односторонней электропроводностью. В отличие от диода сопротивление тиристора определяется не только полярностью напряжения $u_{вх}$, но и зна-

чением управляющего напряжения u_y . Переключение тиристорного ключа в открытое состояние происходит при условии, что u_y достигает определенного значения $U_{y.вкл}$, называемого отпирающим напряжением управления.

На рис. 1.13, в приведена схема однополупериодного управляемого выпрямителя. Отпирание тиристора осуществляется подачей периодической последовательности импульсов управляющего напряжения u_y . На рис. 1.14, а показаны графики мгновенных значений

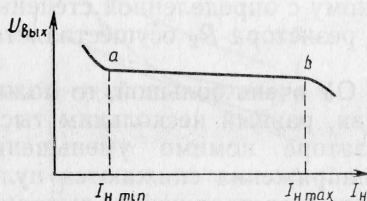


Рис. 1.12. Выходная характеристика компенсационного стабилизатора

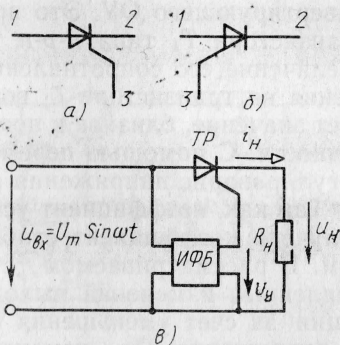


Рис. 1.13. Условное графическое обозначение тиристора с управлением по катоду (а) и по аноду (б), схема однополупериодного управляемого выпрямителя (в)

венных значений напряжения u_H для случая, когда управляющие импульсы поступают на управляющий электрод в моменты времени $t=0$, $t=T$, $t=2T$ и т. д. Графики u_H , представленные на рис. 1.14, б, соответствуют случаю, когда управляющие импульсы поступают в моменты времени t' , $t'+T$, $t'+2T$ и т. д. Изменением значения t' и угла α , называемого углом управления, можно регулировать постоянную составляющую выпрямленного напряжения и тока. Регулирование t' , а следовательно, значения выпрямленного напряжения осуществляется (см. рис. 1.13, в) импульсным фазовым блоком (ИФБ) управления. Он формирует управляющие импульсы, отвечающие определенным требованиям. Они не должны вызывать нагрев управляющего электрода и должны обеспечивать четкое отпирание тиристора. Исходя из этого оптимальной формой управляющих импульсов является короткий импульс с крутым фронтом. Работу ИФБ рассмотрим на примере двухполупериодного управляемого выпрямителя (рис. 1.15, а), собранного на тиристорах $ТР_1$ и $ТР_2$.

Напряжение на ИФБ подается через мостовой фазовращатель, содержащий трансформатор с выводом средней точки вторичной обмотки, а также конденсатор C и переменный резистор

R (рис. 1.15, б). Как видно из круговой диаграммы (рис. 1.15, в), при изменении сопротивления R начальная фаза выходного напряжения фазовращателя u_{dc} может изменяться в пределах от нуля до 180° . При этом действующее значение напряжения U_{dc} остается неизменным.

Рис. 1.14. Осциллограммы напряжения в нагрузочном устройстве при импульсно-фазовом управлении $\alpha = 0^\circ$ (а) и $\alpha \neq 0^\circ$ (б)

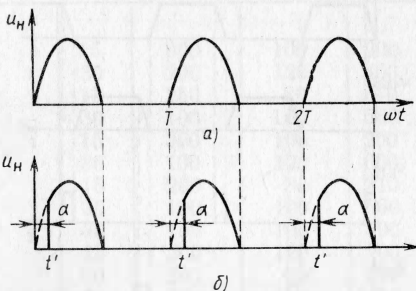
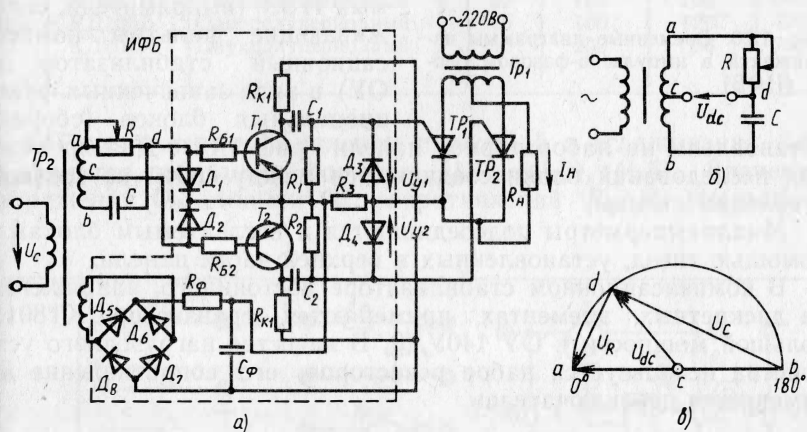


Рис. 1.15. Схемы двухполупериодного управляемого выпрямителя с импульсно-фазовым блоком (а) и мостового фазовращателя (б), векторная диаграмма мостового фазовращателя (в)



Напряжение u_{dc} поступает на входы усилителей-ограничителей, собранных на транзисторах T_1, T_2 . Питательное коллекторное напряжение подается на транзисторы с мостового выпрямителя (диоды D_5-D_8 и фильтр R_{ϕ}, C_{ϕ}). Усилители на транзисторах T_1, T_2 работают поочередно. При $u_{dc} > 0$ диод D_1 шунтирует вход транзистора T_1 , а при $u_{dc} < 0$ диод D_2 шунтирует вход транзистора T_2 .

Напряжения на транзисторах $u_{кэ1}$ и $u_{кэ2}$ имеют трапециевидальную форму (рис. 1.16), так как амплитуда напряжения значительно превышает пределы линейного участка входных характеристик транзисторов. Дифференцирующие цепочки C_1R_1 и C_2R_2 преобразуют трапециевидальное напряжение в последовательность импульсов малой длительности. На управляющие электроды транзисторов поступают только положительные

импульсы напряжений u_{y1} , u_{y2} (рис. 1.16), так как при отрицательных значениях напряжений управляющие электроды шунтируются диодами D_3 , D_4 .

Регулируя начальную фазу выходного напряжения фазовращателя, можно изменять момент возникновения управляющих импульсов, т. е. регулировать значение выпрямленного напряжения.

В настоящее время в управляемых выпрямителях ИФБ начали применять микропроцессоры.

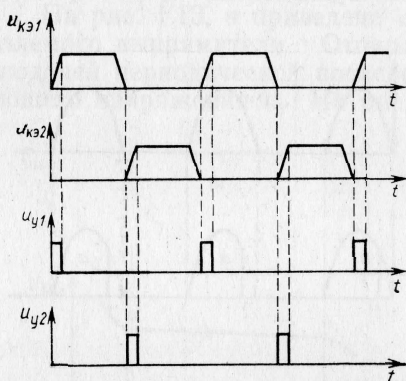


Рис. 1.16. Временные диаграммы напряжений в импульсно-фазовом блоке (ИФБ)

установлены на лабораторной панели (рис. 1.17). Для проведения исследований блоки соединяются между собой по соответствующим схемам.

Миллиамперметры подсоединяются к исследуемым блокам с помощью гнезд, установленных в верхней части панели.

В компенсационном стабилизаторе постоянного напряжения на дискретных элементах применяются транзистор КТ801А большой мощности и ОУ 140УД8. В качестве нагрузочного устройства используется набор резисторов, его сопротивление R_n изменяется переключателем.

Задание

А. Выполняется при подготовке к работе.

1. Изобразить схемы однополупериодного и двухполупериодного выпрямителей. На схемах показать включение приборов для измерений $U_{н.ср}$ и $I_{н.ср}$.

2. Используя разложение в ряд Фурье, рассчитать напряжение на нагрузочном резисторе $U_{н.ср}$ для однополупериодного и мостового выпрямителей без фильтра. Значение U_2 взять из табл. 1.1 в соответствии с номером бригады.

3. Рассчитать значение среднего выпрямленного тока $I_{н.ср}$ и максимального обратного напряжения на диоде $U_{обр\ max}$ для однополупериодного и мостового выпрямителей без фильтра и сравнить расчетные значения с паспортными данными соответствующих диодов (табл. 1.2).

Описание лабораторной панели

Все элементы неуправляемых ИВЭ (выпрямители, сглаживающие фильтры, компенсационный стабилизатор на ОУ) в виде законченных функциональных блоков (сборок)

Таблица 1.1

Номер бри- гады	Тип диода	Тип выпрямителя	U_2 , В	C_Φ , мкф	R_Φ , Ом	R_H , Ом
1	КД106А	Однополупериодный	15	300	100	200
2	КД202Д	Двухполупериодный	30	200	120	460
3	КД106А	»	15	250	80	310
4	КД105Б	»	30	100	100	560
5	КД106А	Однополупериодный	15	300	100	200
6	КД202Д	»	30	100	120	600
7	КД106А	Двухполупериодный	15	200	80	310
8	КД105Б	»	30	100	100	560
9	КД202Д	Однополупериодный	30	150	100	500
10	КД217Б	»	15	300	120	200
11	КД105Б	»	30	200	80	250
12	КД226Б	»	15	300	100	150
13	КД217Б	Двухполупериодный	30	150	100	600
14	КД105Б	Однополупериодный	15	100	120	400
15	КД202А	Двухполупериодный	30	200	80	700

4. Рассчитать коэффициенты пульсаций и сглаживания для RC -фильтра, используя формулы (1.1), (1.2), (1.5). Значения напряжения U_2 , емкости C_Φ , сопротивлений R_Φ , R_H указаны в

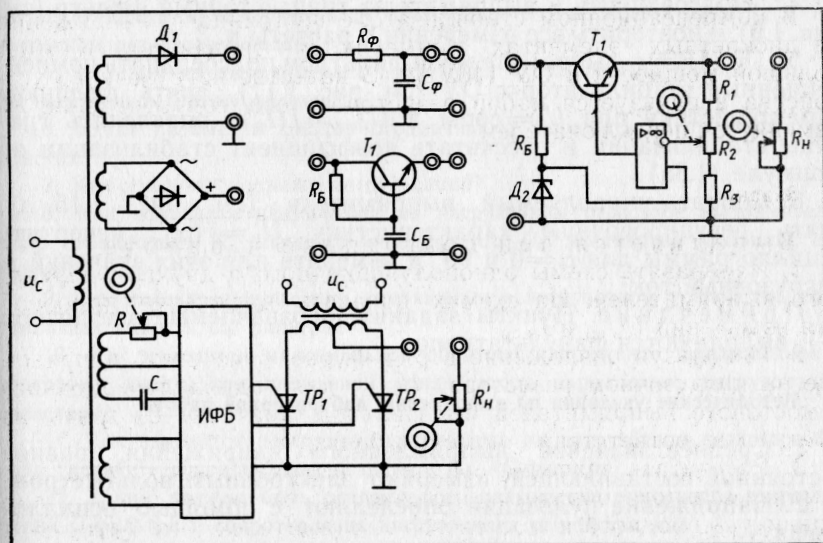


Рис. 1.17. Схема испытательной панели лабораторного стенда

табл. 1.1, а значения основных электрических параметров диодов — в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Тип диода	$U_{пр.ср}, В,$ не более	$I_{пр.ср}, мА$	$I_{обр.ср}, мкА$	$U_{обр. max}, В$
КД105Б	1	300	100	400
КД106А	1	300	100	100
КД202Д	1	5000	1000	100
КД217Б	1,3	1000	2000	200

Б. Выполняется в лаборатории.

1. Собрать однополупериодный или двухполупериодный выпрямители (табл. 1.1), снять и построить внешнюю характеристику выпрямителя $U_{н.ср} = f(I_{н.ср})$. Начертить осциллограмму напряжения на нагрузочном резисторе.

Измерить переменную составляющую напряжения на нагрузочном резисторе и определить коэффициент пульсаций.

2. Подсоединить к выпрямителю емкостный фильтр, повторить все измерения и расчеты п. 1, построить внешнюю характеристику.

3. Заменить в исследуемых ИВЭ емкостный фильтр RC -фильтром (см. рис. 1.7, б), повторить все измерения и расчеты п. 1, рассчитать коэффициент сглаживания RC -фильтра и построить внешнюю характеристику.

4*. Подсоединить к выпрямителю транзисторный фильтр (см. рис. 1.9) и повторить все измерения и расчеты п. 3.

5*. К ИВЭ с выпрямителем и фильтром подсоединить компенсационный стабилизатор с ОУ (см. рис. 1.11), снять внешнюю характеристику при $U_2 = \text{const}$ и $U_{вых} = f(I_{н.ср})$, определить границы стабилизации и рассчитать коэффициент стабилизации по формуле (1.8а).

6. Собрать управляемый выпрямитель (см. рис. 1.15, а), снять регулировочную характеристику $U_{н.ср} = f(\alpha)$, начертить осциллограммы для $\alpha = 0$ и 90° и измерить для этих значений α нагрузочный ток.

Примечание. Пункты задания, обозначаемые звездочкой (*), выполняются факультативно.

Методические указания по выполнению лабораторной работы

1. Среднее значение выпрямленного напряжения, равное постоянной составляющей, измеряют электронным вольтметром.

2. Напряжение пульсаций определяют с помощью осциллографа.

3. В управляемом выпрямителе установлены тиристоры типа КУ-101Б ($I_{пр. доп} = 75$ мА, $U_{обр. max} = 50$ В, $P_{К max} = 150$ мВт,

$I_{\text{упр}} = 15 \text{ мкА}$). На испытательной панели схема импульсно-фазового блока управления изображена не в полном объеме. На панели изображены элементы мостового фазовращателя: конденсатор C и переменный резистор R , с помощью которого изменяется угол сдвига фаз выходного напряжения моста по отношению к его входному напряжению, а следовательно, время прихода импульсов на управляющие электроды тиристоров, т. е. угол управления α . Остальная часть схемы (см. рис. 1.15, а), в которую входят диоды D_1, D_2 , транзисторы T_1, T_2 , а также диоды $D_3—D_8$ вместе с дифференцирующими цепочками R_1C_1, R_2C_2 , обозначена ИФБ.

В компенсационном стабилизаторе постоянного напряжения использованы транзистор КТ801А типа $n-p-n$, ОУ 140УД8 и стабилитрон КС212Ж. Коэффициент обратной связи β регулируют переменным резистором R_2 , ручка которого находится на внутренней стороне испытательной панели.

Контрольные вопросы

1. Начертите осциллограммы напряжения на нагрузочном резисторе одно- и двухполупериодного выпрямителей.

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

3. Прибором какой системы измеряют постоянную составляющую тока и напряжения?

4. В каком из выпрямителей постоянная составляющая тока I_n в нагрузочном резисторе больше?

5. В каком из выпрямителей постоянная составляющая напряжения U_n на нагрузочном резисторе меньше?

6. Какие параметры диодов ограничивают мощность нагрузочного устройства?

7. Как измерить напряжение пульсаций?

8. Как изменится напряжение на нагрузочном резисторе выпрямителя, если параллельно R_n включить конденсатор C_Φ достаточно большой емкости?

9. Как изменятся пульсации напряжения в нагрузочном устройстве, если увеличить емкость C_Φ фильтра?

10. Как изменится максимальное обратное напряжение, приложенное к запертому диоду, при включении конденсатора параллельно нагрузочному резистору?

11. Как изменится постоянное напряжение на нагрузочном резисторе R_n , если увеличить сопротивление резистора R_Φ RC-фильтра?

12. Каким должно быть оптимальное соотношение емкостного сопротивления C -фильтра и сопротивления нагрузочного устройства R_n ?

13. Каковы преимущества и недостатки RC-фильтра по сравнению с транзисторным фильтром?

14. Как изменится коэффициент сглаживания Г-образного фильтра при последовательном соединении двух таких фильтров (коэффициент сглаживания каждого из них q_1 и q_2)?

15. Как изменится коэффициент стабилизации $K_{ст}$ и компенсационного стабилизатора, если уменьшить коэффициент усиления усилителя, собранного на ОУ?

16. Как изменится напряжение на выходе стабилизатора при уменьшении опорного напряжения в компенсационном стабилизаторе?

17. Как изменится выпрямленное напряжение управляемого выпрямителя при изменении угла управления α от 0 до $\pi/2$?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

Исследование простейших транзисторных усилителей

Цель работы. Изучение принципа работы и исследование характеристик простейших усилителей на биполярных, полевых и составных транзисторах, включенных по схемам ОЭ, ОК (ОИ, ОС).

Краткие теоретические сведения

В современной технике при решении многих инженерных задач возникает необходимость в усилении слабых электрических сигналов, что осуществляется электронными усилителями. Электронным усилителем называют устройство, предназначенное для усиления напряжения, тока и мощности электрических сигналов.

В настоящее время в электронных усилителях используются биполярные и полевые транзисторы. Исследуемые в данной работе электронные транзисторные усилители являются основными видами усилителей как на дискретных элементах, так и в интегральных микросхемах.

Усилители на биполярных транзисторах. Одним из наиболее распространенных усилителей на биполярных транзисторах является усилитель с общим эмиттером (ОЭ). В этом усилителе (рис. 2.1, а) эмиттер является общим электродом для входной и выходной цепей. Входное напряжение $u_{вх}$ от источника усиливаемого сигнала подается на усилительный каскад через конденсатор связи $C_{с1}$.

Усиленное выходное напряжение может быть снято как с резистора R_K , так и с транзистора, поскольку переменные составляющие этих напряжений равны (но противофазны). Однако на практике выходное напряжение удобнее снимать с транзистора, так как в усилителях ОЭ эмиттер заземляется и выходное напряжение снимается между заземленной точкой корпуса \perp (землей) и коллектором транзистора. В этом случае вход и выход усилителя имеют общую точку \perp . Если выходное на-

пряжение снимать с резистора R_K , то общей точки между входом и выходом усилителя не будет, что вызывает большие неудобства, поскольку анализ работы и измерения в усилителях и других электронных устройств ведут относительно «земли».

Анализ работы усилителя ОЭ удобно проводить с помощью вольт-амперных характеристик транзистора (рис. 2.2): входной характеристики $I_B = f(U_B)$ (на рис. 2.2 она повернута на

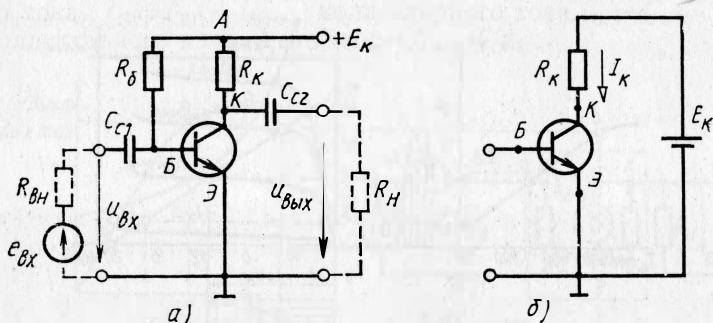


Рис. 2.1. Схема усилительного каскада с общим эмиттером (а), упрощенная схема (б)

угол 90°) и семейства выходных характеристик $I_K = f(U_K)$ при разных токах базы. Для коллекторной цепи усилителя (рис. 2.1, б) в соответствии со вторым законом Кирхгофа можно записать $U_K = E_K - R_K I_K$. Графическое решение этого уравнения показано на рис. 2.2.

Прямая MN , называемая линией нагрузки, построена по двум точкам, соответствующим режиму холостого хода и короткого замыкания (координаты точки N : $I_K = 0$, $U_K = E_K$; координаты точки M : $U_K = 0$, $I_K = E_K/R_K$). Точки пересечения линии нагрузки с выходными характеристиками транзистора определяют ток I_K и напряжение на транзисторе U_K при любом заданном значении тока базы I_B .

Сопротивление резистора R_K выбирают исходя из требуемого усиления входных сигналов. Но при этом надо иметь в виду, чтобы линия нагрузки проходила левее и ниже допустимых значений $U_{K \max}$, $I_{K \max}$ и $R_{K \max}$ и обеспечивался достаточно протяженный линейный участок переходной характеристики. С целью выполнения этих требований сопротивление R_K должно составлять 0,2—5 кОм для транзисторов малой мощности и ~ 100 Ом для транзисторов средней мощности.

Переходная, или передаточная, характеристика усилителя $I_K = f(I_B)$ построена по точкам пересечения линии нагрузки с выходными характеристиками транзистора. Из рис. 2.2 видно, что передаточная характеристика нелинейна, но на ней можно выделить линейный участок ab .

В усилителе действуют два источника: источник постоянной ЭДС E_K и источник усиливаемого переменного напряжения $e_{вх}$.

Анализ работы любого усилителя следует начинать с режима покоя, т. е. при $u_{вх}=0$. Резистор R_B , включенный в цепь базы, обеспечивает требуемый режим покоя, который на характеристиках рис. 2.2 определяется точкой Π , называемой рабочей точкой. Для усиления входных сигналов с минимальными

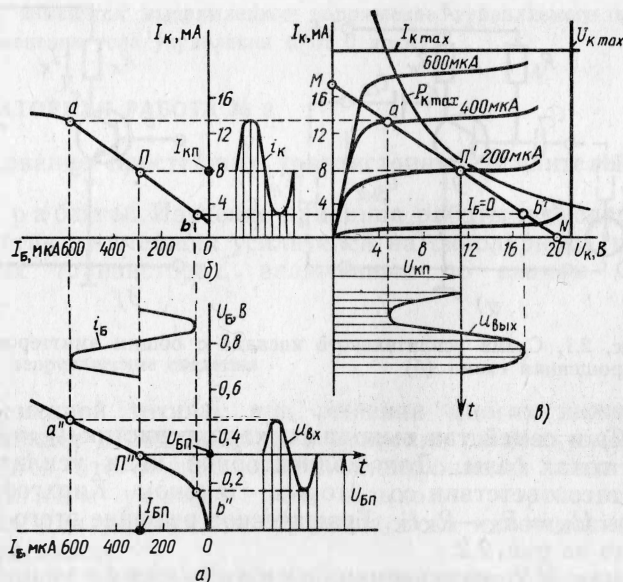


Рис. 2.2. Временные зависимости базового и коллекторного токов, входного и выходного напряжений

линейными искажениями рабочую точку Π выбирают на середине линейного участка ab переходной характеристики $I_K=f(I_B)$ (рис. 2.2). Этому режиму должны соответствовать определенные значения токов $I_{БП}$, $I_{КП}$ и напряжений $U_{БП}$, $U_{КП}$. На практике для транзисторов малой и средней мощности токи транзистора и напряжения на нем в режиме покоя выбирают приблизительно такими:

$$U_{КП} \approx E_K/2, \quad I_{КП} \approx (E_K/2)/R_K, \quad I_{БП} \approx I_{КП}/h_{21}. \quad (2.1)$$

При этом $U_{БП} \approx 0,3$ В для германиевых и $U_{БП} \approx 0,65$ В для кремниевых транзисторов.

Указанный режим обеспечивается сопротивлением резистора R_B , определяемым по формуле

$$R_B = (E_K - U_{БП})/I_{БП} \approx E_K/I_{БП}. \quad (2.2)$$

Конденсатор C_{c1} включают на входе усилителя для того, чтобы не создавать постоянной составляющей тока в источнике усиливаемых сигналов $e_{вх}$ за счет действия источника питания E_K . Кроме того, при отсутствии конденсатора C_{c1} нарушается режим работы усилителя по постоянной составляющей.

При подаче на вход усилителя переменного входного напряжения $u_{вх}$ напряжение $u_{бэ}$ становится пульсирующим (рис. 2.2): $u_{бэ} = U_{БП} + u_{вх}$. Это вызывает пульсации базового тока $i_B = I_{БП} + i_{B\sim}$, коллекторного тока $i_K = I_{КП} + i_{K\sim}$ и коллекторного напряжения $u_K = U_{КП} + u_{K\sim}$.

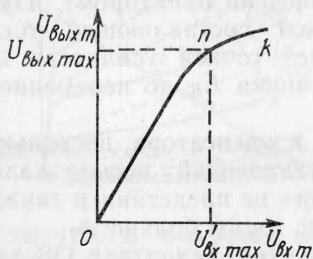


Рис. 2.3. Амплитудная характеристика усилительного каскада

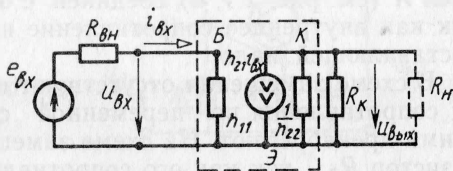


Рис. 2.4. Схема замещения усилительного каскада с общим эмиттером

Конденсатор C_{c2} (конденсатор связи) задерживает постоянную составляющую коллекторного напряжения и пропускает в нагрузочное устройство усилителя только переменную составляющую $u_{K\sim}$, являющуюся выходным напряжением усилителя.

Если изменения входного напряжения $u_{вх}$, базового $i_{B\sim}$ и коллекторного $i_{K\sim}$ токов укладываются в линейные участки входной и передаточной характеристик, то форма выходного напряжения будет соответствовать форме входного напряжения (рис. 2.2). При больших входных сигналах, при которых базовые и коллекторные токи выходят за пределы линейного участка ab передаточной характеристики, форма выходного напряжения значительно искажается. Эти искажения, обусловленные нелинейностью вольт-амперных характеристик, называют нелинейными.

Для оценки диапазона изменений входных напряжений, усиливаемых без искажений, используют амплитудную характеристику $U_{вых т} = f(U_{вх т})$, представляющую собой зависимость амплитудного значения выходного напряжения от амплитудного значения входного напряжения (рис. 2.3).

По амплитудной характеристике в линейной ее части (участок On) можно определить коэффициент усиления K_U . На участке nk коэффициент усиления уменьшается, что объясняется выходом усиливаемого сигнала за пределы линейного участка ab

передаточной характеристики (см. рис. 2.2). Амплитудная характеристика позволяет выявить динамический диапазон усилителя, который определяется напряжением $U_{\text{вых} \text{ м}}$, ограничиваемым допустимыми нелинейными искажениями.

При работе усилителя в линейном режиме, т. е. без нелинейных искажений, все основные параметры усилителя на биполярном транзисторе (K_U , $R_{\text{вх}}$, $R_{\text{вых}}$) можно рассчитать с помощью схемы замещения усилителя для переменных составляющих токов и напряжений (рис. 2.4). Построенные схемы замещения усилителя начинают со схемы замещения транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером (обведена пунктиром). При этом следует учесть, что по переменной составляющей тока узел A (см. рис. 2.1, a) соединен с общей точкой усилителя \perp , так как внутреннее сопротивление источника E_K по переменной составляющей мало.

В схеме замещения отсутствуют оба конденсатора, поскольку их сопротивления по переменной составляющей весьма малы и ими пренебрегают. На схеме замещения не представлен также резистор R_B , так как его сопротивление много больше h_{11} .

Для определения коэффициента усиления усилителя ОЭ запишем для узла K схемы замещения уравнение по первому закону Кирхгофа (при $R_H = \infty$):

$$h_{21}i_{\text{вх}} + h_{22}u_{\text{вых}} + u_{\text{вых}}/R_K = 0. \quad (2.3)$$

Входное напряжение определяется по формуле

$$u_{\text{вх}} = h_{11}i_{\text{вх}}. \quad (2.4)$$

Решая совместно уравнения (2.3) и (2.4), получим (при $R_H = \infty$)

$$\underline{K}_{U_x} = \frac{\dot{U}_{\text{вых}}}{\dot{U}_{\text{вх}}} = -\frac{h_{21}}{h_{11}} \frac{R_K}{1 + h_{22}R_K}. \quad (2.5)$$

Так как $h_{22}R_K$ обычно много меньше единицы, то

$$K_{U_x} = |\underline{K}_{U_x}| \approx \frac{h_{21}}{h_{11}} R_K. \quad (2.6)$$

Знак «—» в выражении (2.5) означает, что входное и выходное напряжения находятся в противофазе.

Из схемы замещения рис. 2.4 легко получить выражения для входного и выходного сопротивлений усилителя:

$$R_{\text{вх}} = h_{11}; \quad (2.7)$$

$$R_{\text{вых}} = \frac{R_K(1/h_{22})}{R_K + 1/h_{22}} = \frac{R_K}{1 + h_{22}R_K} \approx R_K. \quad (2.8)$$

Входное сопротивление усилительного каскада с общим эмиттером обычно определяют по справочнику, где указаны значения h -параметров. Для транзисторов малой и средней мощ-

ностей оно, как правило, лежит в пределах от нескольких десятков ом до единиц килоом. Выходное сопротивление усилителя ОЭ обычно больше входного, поскольку оно определяется сопротивлением R_K , имеющим, как правило, значения несколько килоом. Это создает значительные трудности в работе усилителя с высокоомным источником усиливаемого напряжения и низкоомным нагрузочным устройством. Коэффициент усиления усилителя с учетом внутреннего сопротивления источника усиливаемо-

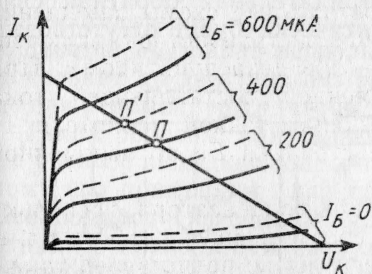


Рис. 2.5. К объяснению влияния температуры на коллекторные характеристики транзистора

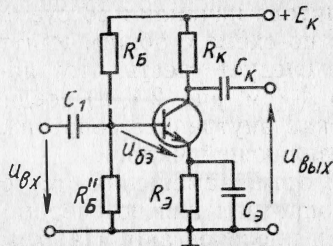


Рис. 2.6. Схема усилительного каскада с эмиттерной температурной стабилизацией

го напряжения $R_{вн}$ и сопротивления нагрузочного устройства R_n определяют по формуле

$$K_U = \frac{U_{ВЫХ}}{E_{ВХ}} = \frac{h_{21}}{R_{вн} + h_{11}} \frac{R_K}{1 + R_K/R_n + h_{22}R_K}. \quad (2.9)$$

Существенным недостатком транзисторов является зависимость их параметров от температуры, что приводит к изменению коллекторных характеристик транзистора (пунктирные кривые на рис. 2.5). Вследствие этого при изменениях температуры изменяется положение рабочей точки усилителя (например, точка P' на рис. 2.5), что может вызвать искажение выходного напряжения. Для предотвращения этого требуется температурная стабилизация рабочей точки. На рис. 2.6 изображена схема усилителя ОЭ с эмиттерной температурной стабилизацией, которая стабилизирует рабочую точку за счет отрицательной обратной связи по постоянному току, возникающей благодаря включению в эмиттерную цепь усилителя резистора $R_Э$. Резисторы R'_B , R''_B необходимы для создания требуемого напряжения $U_{БЭП}$ в режиме покоя:

$$U_{БЭП} = \frac{E_K R''_B}{R'_B + R''_B} - R_Э I_{ЭП}. \quad (2.10)$$

При повышении температуры увеличивается ток $I_{ЭП} \approx I_{кп}$, а следовательно, падение напряжения на резисторе $R_Э$, поэто-

му напряжение $U_{БЭП}$ уменьшается. Это вызывает уменьшение базового тока $I_{БП}$, что приводит к уменьшению тока $I_{КП}$ почти до первоначального значения. Для устранения отрицательной обратной связи по переменной составляющей, которая появляется при наличии напряжения $u_{вх}$, резистор $R_Э$ шунтируют конденсатором $C_Э$, сопротивление $X_{C_Э}$ которого на низшей частоте усиливаемого сигнала должно быть на порядок меньше $R_Э$. При таком выборе емкости $C_Э$ отрицательная обратная связь по переменной составляющей практически будет отсутствовать.

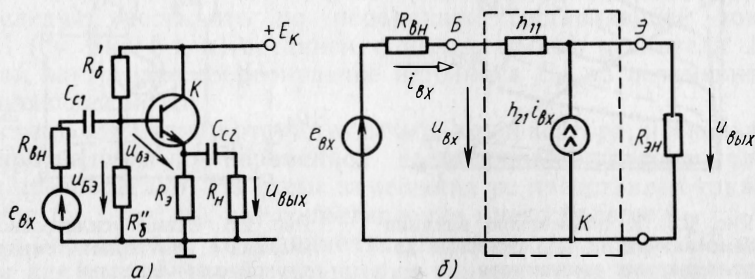


Рис. 2.7. Схема эмиттерного повторителя (а) и его схема замещения (б)

В усилителе ОЭ с эмиттерной стабилизацией рекомендуется режим:

$$U_{КП} \approx (2/3) E_K; \quad U_{ЭП} \approx (1/3) E_K. \quad (2.11)$$

Усилитель (рис. 2.7, а), в котором транзистор включен по схеме с общим коллектором, называют эмиттерным повторителем. В этом усилителе основной резистор, с которого снимается выходное напряжение, включен в эмиттерную цепь. Коллектор транзистора по переменной составляющей напряжения соединен с общей точкой усилителя Δ , так как внутреннее сопротивление источника питания E_K очень мало. В эмиттерном повторителе имеется отрицательная обратная связь как по постоянной, так и по переменной составляющим напряжения.

Для определения основных параметров эмиттерного повторителя следует рассмотреть его упрощенную схему замещения, изображенную на рис. 2.7, б (при условии $1/h_{22} \gg R_Э$). В этой схеме h_{11} и h_{21} являются параметрами транзистора при включении его по схеме ОЭ; сопротивление резистивного элемента $R_{Эн} = R_Э R_n / (R_Э + R_n)$.

Резисторы $R'_Б$, $R''_Б$ в этой схеме не представлены по той же причине, что и резистор $R_Б$ в схеме замещения усилителя ОЭ. Нетрудно убедиться, что

$$K_U = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = (1 + h_{21}) \frac{R_{\text{ЭН}}}{h_{11} + (1 + h_{21}) R_{\text{ЭН}}}; \quad (2.12)$$

$$R_{\text{вх}} = R_{\text{ЭН}} (1 + h_{21}) + h_{11}; \quad (2.13)$$

$$R_{\text{вых}} = (h_{11} + R_{\text{вн}}) / (1 + h_{21}). \quad (2.14)$$

В этом усилителе обычно $K_U \approx 0,9 \div 0,99$, $R_{\text{вх}}$ примерно в $1 + h_{21}$ раз больше, а $R_{\text{вых}}$ — в $1 + h_{21}$ меньше, чем в усилителе с общим эмиттером. Обычно для транзисторов малой и средней мощностей $R_{\text{вх}}$ равно несколько килоом, а $R_{\text{вых}}$ колеблется от нескольких до десятков ом. В режиме покоя эмиттерного повторителя рекомендуется, чтобы $U_{\text{ЭП}} \approx 0,5 E_K$.

Таким образом, эмиттерный повторитель имеет большое входное и малое выходное сопротивления. Поэтому его применяют для согласования высокоомного источника усиливаемого сигнала с низкоомным нагрузочным устройством.

В последние годы в усилителях на дискретных элементах и в интегральных микросхемах стали применять составные транзисторы, представляющие собой комбинацию из двух каскадно включенных транзисторов. Чаще других используют комбинацию, известную под названием схемы Дарлингтона (рис. 2.8). Как видно из схемы, составной транзистор имеет три вывода, эквивалентные эмиттеру, базе и коллектору. Поэтому его можно рассматривать как единый транзистор, обладающий определенными параметрами. Основными параметрами составного транзистора являются коэффициент усиления по току h_{21} и резистивный параметр h_{11} :

$$h_{21} = h_{21,1} h_{21,2}; \quad (2.15)$$

$$h_{11} = h_{11,1} + (1 + h_{21,1}) h_{11,2}. \quad (2.16)$$

В настоящее время составные транзисторы выпускаются в виде отдельных приборов. Например, широко используется составной транзистор КТ827, параметры которого представлены в табл. 2.3.

Составные транзисторы находят применение в усилителях ОЭ. Особенно часто составной (по схеме Дарлингтона) транзистор применяется в эмиттерных повторителях. Анализ изменений основных параметров эмиттерного повторителя на составном транзисторе по формулам (2.15), (2.16) показывает, что он имеет более высокое входное и более низкое выходное сопротивление.

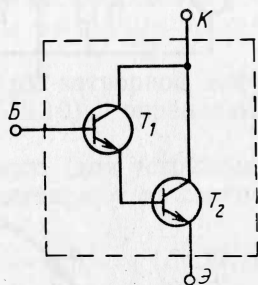


Рис. 2.8. Схема на составном транзисторе (схема Дарлингтона)

Усилители на полевых транзисторах. В последние годы начали широко применять усилители на полевых транзисторах, так как они обладают существенно большими входным сопротивлением, температурной стабильностью и радиационной стойкостью по сравнению с усилителями на биполярных транзисторах. Однако их частотные свойства хуже, чем у аналогичных усилителей на биполярных транзисторах.

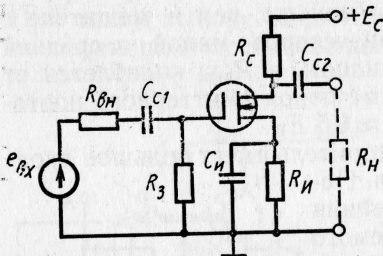
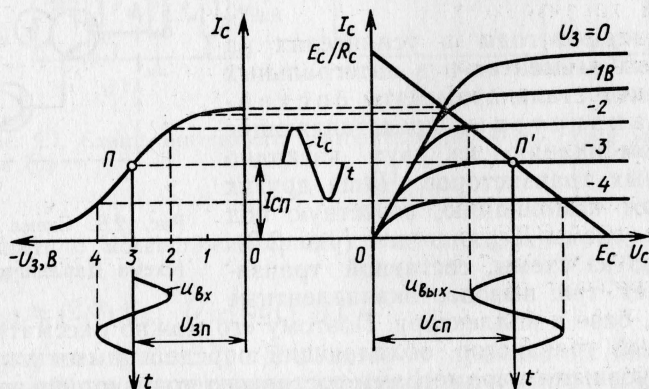


Рис. 2.9. Схема усилителя на полевом транзисторе с общим истоком

Рис. 2.10. Графический анализ работы усилительного каскада на полевом транзисторе



Построение усилителей на полевых транзисторах осуществляется так же, как и на биполярных транзисторах. Различают усилители с общим истоком (ОИ) и с общим стоком (ОС).

Наибольшее распространение получили усилители с общим истоком, простейшая схема которого на МОП-транзисторе изображена рис. 2.9. В этом усилителе резистор R_c , с помощью которого создается выходное напряжение, включен в цепь стока. Так же как и в усилителе ОЭ, входное напряжение $u_{вх}$ от источника сигналов $e_{вх}$ подается на усилительный каскад через конденсатор связи $C_{с1}$, а выходное (усиленное) снимается с транзистора и подается на нагрузочный резистор $R_{н}$ через конденсатор связи $C_{с2}$. Резистор R_3 в цепи затвора обеспечивает подачу на затвор отрицательного по отношению к истоку потенциала, создаваемого за счет падения напряжения на резисторе $R_{и}$. Сопротивление резистора R_3 для полевого транзистора должно быть не более 0,1—0,03 от номинального сопротивления постоянному

току промежутка затвор — исток. Для МОП-транзистора это сопротивление берут обычно равным ~ 1 МОм. Такой выбор сопротивления R_3 практически исключает влияние разброса сопротивления промежутка затвор — исток транзистора на входное сопротивление усилителя.

Принцип выбора режима покоя в рассматриваемом усилителе такой же, как и в усилителе на биполярном транзисторе. Это видно из рис. 2.10, где приведен графический анализ работы усилителя с общим истоком. Напряжение смещения $U_{зп}$ должно быть больше или равно $U_{вх\max}$. В этом режиме в транзисторе появляется ток $I_{СП}$, а между стоком и истоком возникает напряжение $U_{СП}$.

При возникновении напряжения $u_{вх}$ ток стока i_c начинает пульсировать, вызывая появление переменной составляющей стокового напряжения, являющейся усиленным выходным напряжением усилителя.

Выбрав рабочую точку Π на середине сток-затворной динамической характеристики $I_c = f(U_3)$ (рис. 2.10), определяют напряжение $U_{зп}$. Тогда $R_{и} = |U_{зп} / I_{СП}|$.

Емкость конденсатора $C_{и}$, предназначенного для устранения отрицательной обратной связи при $u_{вх} \neq 0$, выбирают из соотношения

$$C_{и} = (10 \div 20) / (\omega_{н} R_{и}), \quad (2.17)$$

где $\omega_{н}$ — нижняя угловая частота усиливаемого напряжения.

Звено автоматического смещения $R_{и}C_{и}$ является также звеном температурной стабилизации, как и в усилителе на биполярном транзисторе.

Для определения основных параметров усилительного каскада на полевом транзисторе используют схему замещения усилителя, изображенную на рис. 2.11.

Коэффициент усиления усилителя

$$K_U = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{S U_{вх}}{U_{вх}} \cdot \frac{R_i R_c}{R_i + R_c} = S \frac{R_i R_c}{R_i + R_c}, \quad (2.18)$$

где S — крутизна, а R_i — внутреннее сопротивление полевого транзистора.

Входное сопротивление усилительного каскада на полевом транзисторе

$$R_{вх} = R_3. \quad (2.19)$$

Усилители на МОП-транзисторах имеют входное сопротивление, равное нескольким мегаом.

Сопротивление стокового резистора R_c выбирают из соотношения $R_c \approx (0,05 \div 0,15) R_i$. Обычно $R_c \approx 10^3 \div 10^4$ Ом. Как видно из схемы замещения, выходное сопротивление

$$R_{вых} = R_i R_c / (R_i + R_c) \approx R_c, \quad (2.20)$$

так как $R_c \ll R_i$.

Обычно сопротивление $R_{\text{вых}}$ составляет несколько килоом. Таким образом, в усилителе ОИ на полевом транзисторе в отличие от усилителя ОЭ на биполярном транзисторе выходное сопротивление много меньше входного.

Помимо усилителя ОИ часто применяют усилитель с общим стоком (ОС), называемый также истоковым повторителем (рис. 2.12).

В этом усилителе нагрузочный резистор $R_{\text{И}}$ включен в цепь истока, а сток по переменной составляющей тока и напряже-

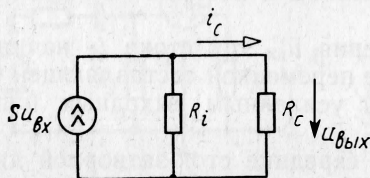


Рис. 2.11. Схема замещения усилителя на полевом транзисторе

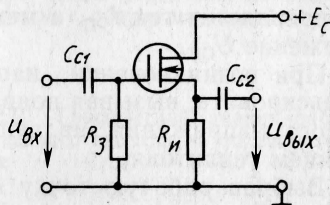


Рис. 2.12. Схема истокового повторителя

ния соединен с общей шиной усилителя. Выходное напряжение, равное переменной составляющей падения напряжения на резисторе $R_{\text{И}}$, снимается через конденсатор связи C_{c2} .

Амплитудно-частотная характеристика усилителя. При усилении входных сигналов, частота которых изменяется от нижней частоты $\omega_{\text{н}}$ до некоторой высокой частоты $\omega_{\text{в}}$, на коэффициент усиления $K_U = |K_U| e^{j\varphi}$ (как на его модуль $|K_U|$, так и на аргумент φ) начинают влиять частотные свойства транзисторов, емкостные сопротивления конденсаторов связи C_c и паразитные емкости в усилителе. Анализ этого влияния приведем на примере усилителя на биполярном транзисторе. Для этого воспользуемся схемой замещения усилителя, изображенной на рис. 2.13. В этой схеме помимо известных элементов в схеме замещения рис. 2.4 имеются новые элементы: конденсатор связи C_c и емкостный элемент $C_0 = (1 + K_U)C_K + C_m$, где K_U — коэффициент усиления по напряжению усилителя; C_K — емкость коллекторного перехода транзистора; C_m — емкость монтажа.

Емкость C_0 может иметь значение от нескольких десятков до нескольких сотен пикофард.

Важной характеристикой усилителя, работающего в широком диапазоне частот, является амплитудно-частотная характеристика, или частотная характеристика, представляющая собой зависимость модуля коэффициента усиления усилителя K_U от частоты.

При работе усилителя на средних частотах, являющихся рабочими частотами, коэффициент усиления K_0 имеет почти постоянное (максимальное) значение. В этой области частот

влиянием C_c и C_0 можно пренебречь, так как емкостное сопротивление X_{C_c} весьма мало по сравнению с $R_{вых}$ усилителя, а X_{C_0} очень велико по сравнению с R_H . Тогда коэффициент усиления будет действительным числом:

$$K_0 \approx h_{21} \frac{R_K}{h_{11} + R_{BH}} \frac{1}{1 + R_K/R_H + h_{22}R_K}. \quad (2.21)$$

Так как $h_{22}R_K \ll 1$, то

$$K_0 \approx \frac{h_{21}}{R_{BH} + h_{11}} \frac{R_K}{1 + R_K/R_H}. \quad (2.21a)$$

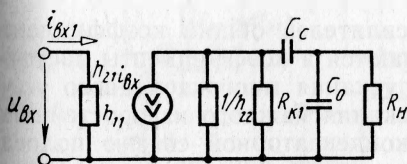


Рис. 2.13. Схема замещения усилителя на биполярном транзисторе с резистивно-емкостной связью

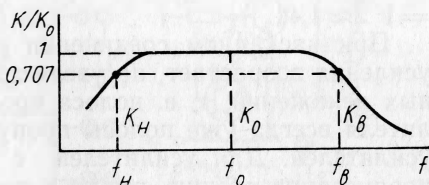


Рис. 2.14. Амплитудно-частотная характеристика усилителя напряжения с резистивно-емкостной связью

Обычно рассматривают нормированную амплитудно-частотную характеристику $K/K_0 = \varphi(f)$ (рис. 2.14). На нижних частотах влиянием емкостного элемента C_0 пренебрегают, поскольку его сопротивление X_{C_c} становится еще больше, чем в рабочем диапазоне частот. В то же время на нижних частотах сопротивление $X_{C_c} = 1/(\omega_n C_c)$ также становится большим (емкость C_c равна десятым долям и единицам микрофард). Падение напряжения на конденсаторе связи C_c с уменьшением частоты возрастает, выходное напряжение уменьшается и, следовательно, коэффициент усиления также уменьшается.

На нижних частотах коэффициент усиления определяется по формуле

$$K_H = \frac{K_0}{\sqrt{1 + [1/(\omega_n \tau_H)]^2}}, \quad (2.22)$$

где $\tau_H = C_c(R_{вых} + R_H)$. Так как $R_{вых} \approx R_K$, то $\tau_H \approx C_c(R_K + R_H)$.

При работе на верхних частотах влиянием конденсатора связи пренебрегают, так как его сопротивление становится весьма малым. При этом, однако, следует учитывать влияние емкостного элемента C_0 , так как его сопротивление становится тоже малым и начинает шунтировать нагрузочный резистор R_H . В результате выходное напряжение и коэффициент усиления

уменьшаются. В этом случае коэффициент усиления

$$K_B = \frac{K_0}{\sqrt{1 + (\omega_B \tau_B)^2}}, \quad (2.23)$$

где
$$\tau_B = C_0 \frac{R_{ВЫХ} R_H}{R_{ВЫХ} R_H} \approx C_0 \frac{R_K R_H}{R_K + R_H}.$$

Уменьшение коэффициента усиления оценивают коэффициентами частотных искажений $M_H = K_0/K_H$ и $M_B = K_0/K_B$.

Частоты f_H , f_B , на которых коэффициенты усиления K_H , K_B достигают допустимых значений, называют границей полосы пропускания усилителя в области нижних (f_H) и верхних (f_B) частот. Обычно принимают $K_0/K_H = K_0/K_B = \sqrt{2} \approx 1,41$.

При каскадном соединении усилителей общий коэффициент усиления возрастает, но увеличиваются и коэффициенты частотных искажений, т. е. полоса пропускания многокаскадного усилителя всегда уже полосы пропускания каждого из простейших усилителей. Для усилителей с конденсаторной связью полоса пропускания обычно лежит в пределах от 20—100 Гц до 150—500 кГц.

Описание лабораторной панели

На лабораторной панели (рис. 2.15) расположены полусборки усилителей на биполярном T_1 , составном T_2 и полевом T_3 транзисторах, а также конденсаторы, переменные и постоянные резисторы, позволяющие собрать усилители ОЭ, ОК, ОИ. Исследуемые в работе типы биполярных, составных и полевых транзисторов, сопротивления резисторов усилителей указаны в табл. 2.1 для каждой бригады студентов, выполняющих лабораторную работу. Параметры транзисторов приведены в

Таблица 2.1

Номер бригады	ОЭ		ОИ		ОК		Составной	
	тип транзистора	R_K , Ом	тип транзистора	R_C , кОм	тип транзистора	$R_{Э}$, Ом	тип транзистора	R_K , Ом
1	КТ342А	510	КП305Д	0,51	КТ342А	510	КТ827А	5,1
2	КТ315В	620	КП302А	7,5	КТ315В	620	КТ827Б	6,2
3	ГТ311Ж	1500	КП305Д	0,75	ГТ311Ж	1500	КТ827В	7,5
4	ГТ404А	390	КП302А	1,6	ГТ404А	390	КТ827А	6,8
5	КТ342А	750	КП305Д	0,62	КТ342А	750	КТ827Б	4,9
6	КТ315В	820	КП302А	6,2	КТ315В	820	КТ827В	5,1
7	ГТ311Ж	1200	КП305Д	0,25	ГТ311Ж	1200	КТ827А	7,5
8	ГТ404А	510	КП302А	8,2	ГТ404А	510	КТ827Б	8,2
9	КТ342А	620	КП305Д	0,82	КТ342А	620	КТ827В	4,7
10	КТ315В	820	КП302А	3,0	КТ315В	820	КТ827А	6,2

табл. 2.2 и 2.3. На панели в левом нижнем углу находится переменный калиброванный резистор R_1 , с помощью которого

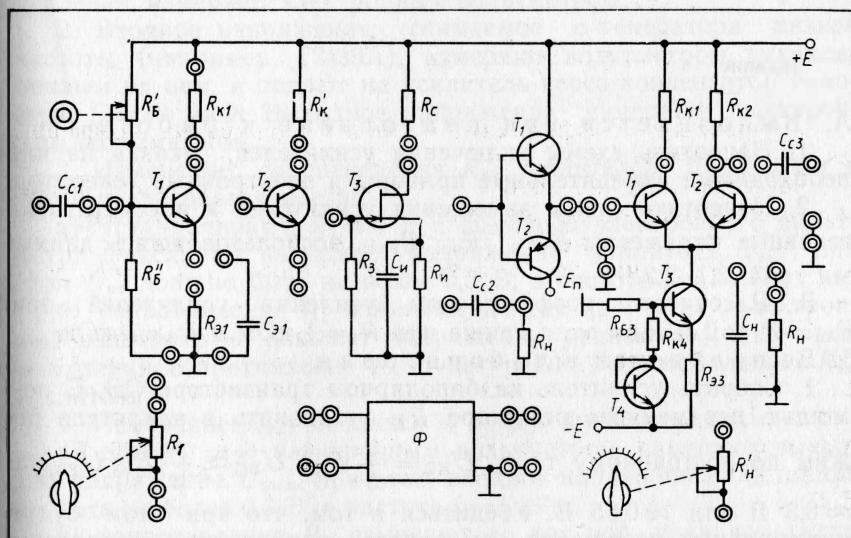


Рис. 2.15. Схема испытательной панели и лабораторного стенда

Таблица 2.2

Тип транзистора	Параметры транзистора					
	h_{11} , Ом	h_{21}	h_{22} , мкСм	S , мА/В	$U_{3И}$ отс.	R_t , кОм
КТ342А	300	25—250*	0,3	—	—	—
КТ315В	200	20—90*	0,3	—	—	—
ГТ311Ж	80	50—200*	500	—	—	—
ГТ404А	100	30—80	100	—	—	—
КП302А	—	—	—	5	5	3,0
КП305Д	—	—	—	5,2—10,5*	—6	6

Таблица 2.3

Тип транзистора	Параметры транзистора			
	h_{21}	$U_{КЭ}$ доп., В	I_K доп., А	P_K доп., Вт
КТ827А, Б, В	6000	100, 80, 60	20	125

* При расчетах коэффициента усиления и других параметров усилителя следует брать среднее значение параметра транзистора.

опытным путем определяется входное сопротивление $R_{вх}$ усилителя, а в правом нижнем углу — резистор R_n' , с помощью которого определяется выходное сопротивление $R_{вых}$ усилителя.

Задание

А. Выполняется при подготовке к работе.

1. Начертить схемы включения усилителей, указав на них необходимые измерительные приборы и электронный генератор.

2. Начертить схемы замещения усилителей и рассчитать их основные параметры K_U , $R_{вх}$, $R_{вых}$, воспользовавшись данными табл. 2.1, 2.2.

3. Рассчитать коэффициенты усиления усилителей при $R_{вн}=R_1=0$ и $R_n=\infty$, а также при $R_1=1$ кОм и $R_n=1$ кОм.

Б. Выполняется в лаборатории.

1. Собрать усилитель на биполярном транзисторе ОЭ. С помощью переменного резистора R_B установить в усилителе режим по постоянному току: $U_{кп} = \frac{2}{3} E_k$; $U_{эп} \approx \frac{1}{3} E_k$; $U_{бэп} \approx$

$\approx 0,3$ В или $\approx 0,65$ В. Убедиться в том, что при этом будут минимальные искажения выходного напряжения усилителя. Синусоидальное напряжение на вход усилителя следует подавать с электронного генератора.

2. При $f=1$ кГц снять амплитудную характеристику усилителя при $R_{вн}=R_1=0$ и $R_n=\infty$. Определить динамический диапазон усилителя и коэффициенты усиления K_U при $R_1=0$ и $R_n=\infty$, а также при $R_1=1$ кОм и $R_n=1$ кОм. Снять осциллограммы при $U_{вх}=10$ и 500 мВ.

3. Измерить входное и выходное сопротивления усилителя.

4. Сравнить K_U , $R_{вх}$ и $R_{вых}$, полученные в результате эксперимента, с расчетными.

5. Определить полосу пропускания усилителя при $U_{вх}=10$ мВ, $R_1=1$ кОм и $R_n=1$ кОм.

6*. Собрать усилитель ОЭ на составном транзисторе, повторить измерения п. 2, 3 и сравнить параметры K_U , $R_{вх}$ и $R_{вых}$ с результатами п. 2, 3.

7*. Собрать усилитель на полевом транзисторе, повторить измерения п. 2, 3 и сравнить их с результатами, полученными для биполярного транзистора.

8. Собрать эмиттерный повторитель. С помощью резистора R_B установить режим работы по постоянному току: $U_{эп} = E_k/2$ и $U_{бп} \approx 0,3$ или $\approx 0,65$ В. При $f=1$ кГц снять амплитудную характеристику и определить коэффициент усиления K_U при $R_1=1$ кОм и $R_n=1$ кОм.

Примечание. Пункты задания, обозначенные звездочкой (*), выполняются факультативно.

1. Постоянные напряжения, создающие необходимый режим усиления, измеряют электронным вольтметром.

2. Входное напряжение, снимаемое с генератора низкой частоты (например, ГЗ-36А), измеряют вольтметром, установленным на нем, и подают на усилитель через конденсатор емкостью $C=30$ мкФ. Выходное напряжение измеряют электронным вольтметром.

3. Измерение сопротивления $R_{вх}$ усилителей производят в такой последовательности:

а) устанавливают $R_1=0$ и с помощью электронного вольтметра фиксируют выходное напряжение усилителя $U_{вых}$, при этом $U_{вх}$ должно быть не более 0,3 В, а частота $f=1$ кГц;

б) сопротивление R_1 изменяют до тех пор, пока электронный вольтметр не покажет напряжение, равное $U_{вых}/2$. В этом положении сопротивление R_1 будет равно сопротивлению $R_{вх}$ усилителя.

4. Измерение $R_{вых}$ сводится к следующим операциям:

а) при $R_n'=\infty$ электронным вольтметром измеряют выходное напряжение $U_{вых}$, при этом входное напряжение $U_{вх}$ должно быть не более 0,3 В, а частота $f=1$ кГц;

б) сопротивление R_n изменяют до тех пор, пока вольтметр не покажет напряжение, равное $U_{вых}/2$. В этом положении сопротивление R_n' будет равно сопротивлению $R_{вых}$ усилителя.

5. Для определения полосы пропускания усилителя при $U_{вх}=10$ мВ на частоте $f=1$ кГц, при которой достигается максимальное усиление, соответствующее средним значениям частоты, находят коэффициент усиления усилителя. Выходное напряжение при этом имеет некоторое значение $U_{вых\max}$. Изменяя частоту входного напряжения с помощью соответствующих ручек генератора низкой частоты, определяют граничные частоты полосы пропускания f_n и f_v , на которых выходное напряжение усилителя уменьшается в $\sqrt{2}$ раз.

Контрольные вопросы

1. Как работает биполярный транзистор?
2. Как работает полевой транзистор?
3. Что такое составной транзистор (транзистор Дарлингтона)?
4. Каково назначение элементов в усилителях ОЭ, ОК, ОИ и ОС?
5. Как влияет на работу усилителей отключение конденсатора $C_{\Theta}(C_{И})$?
6. Чем отличаются основные параметры K_U , $R_{вх}$, $R_{вых}$ усилителей на биполярном, полевом и составном транзисторах?
7. Как влияет на работу усилителей ОЭ и ОИ закорачивание соответственно резисторов R_K , R_C ?
8. Каким образом по амплитудной характеристике усилителя можно определить коэффициент усиления?

9. Как по амплитудно-частотной характеристике усилителя определить его полосу пропускания?

10. Как влияет на работу усилителя закорачивание конденсаторов связи $C_{с1}$ и $C_{с2}$?

11. Чем объясняются искажения формы выходного напряжения при больших напряжениях $U_{вх}$?

12. Как влияет на работу усилителей пробой конденсаторов $C_{э}$ и $C_{и}$?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

Исследование дифференциального усилителя и бестрансформаторного усилителя мощности

Цель работы. Изучение принципа работы и исследование характеристик дифференциального усилителя, являющегося в современных электронных устройствах основным усилителем, и бестрансформаторного усилителя мощности, применяемого в качестве выходного усилителя.

Краткие теоретические сведения

Дифференциальный усилитель. Дифференциальным усилителем называют усилитель, усиливающий разность двух напряжений. Эти усилители нашли широкое применение в различных электронных устройствах, в том числе в интегральных микросхемах. Дифференциальный усилитель представляет собой сбалансированную мостовую электрическую цепь. Чаще всего в качестве усилителя используют параллельно-балансный усилитель (рис. 3.1). Два плеча такого моста составляют резисторы R_{K1} , R_{K2} , а два других — транзисторы T_1 , T_2 . Спротивление резистора $R_{э} \gg h_{11}$ служит для стабилизации эмиттерного тока $I_{э} = I_{э1} + I_{э2} \approx I_{K1} + I_{K2}$. Входные напряжения $u_{вх1}$, $u_{вх2}$ подаются в базовые цепи транзисторов, а выходное напряжение снимается между коллекторами транзисторов, т. е. «с диагонали» моста. К другой «диагонали», как видно из схемы, подключаются источники питания с ЭДС $+E_K$ и $-E_K$. Второй источник ($-E_K$) нужен для обеспечения отрицательного потенциала эмиттеров $Э_1$ и $Э_2$, чтобы обеспечить необходимый режим покоя. При подаче напряжений $u_{вх1}$ и $u_{вх2}$ выходное напряжение

$$u_{вх} = u_{21} = K_{U1,2} (u_{вх1} - u_{вх2}). \quad (3.1)$$

Если левая и правая половины усилителя симметричны: $R_{K1} = R_{K2} = R_K$, а параметры транзисторов одинаковы, то нетрудно убедиться, что при $R_H = \infty$

$$K_{U1,2} = K_{U1} = K_{U2} = \frac{h_{21}}{h_{11}} \frac{R_K}{1 + h_{22}R_K} \approx \frac{h_{21}}{h_{11}} R_K. \quad (3.2)$$

Входное сопротивление дифференциального усилителя

$$R_{вх1,2} = 2h_{11}, \quad (3.3)$$

а выходное сопротивление

$$R_{вых1,2} = 2R_K / (1 + h_{22}R_K) \approx 2R_K. \quad (3.4)$$

В дифференциальном усилителе можно подавать усиливаемый сигнал на один из входов, заземляя при этом другой (рис. 3.2). Такое включение усилителя называют несимметричным.

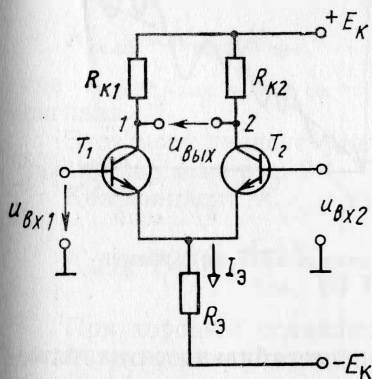


Рис. 3.1. Схема дифференциального усилителя

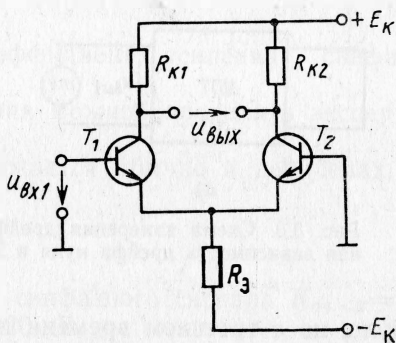


Рис. 3.2. Схема дифференциального усилителя с одним заземленным входом

ным в отличие от рассмотренного симметричного включения. При несимметричном включении

$$K_U = \frac{h_{21}}{h_{11}} \frac{R_K}{1 + h_{22}R_K}; \quad (3.5)$$

$$R_{вх} = 2h_{11};$$

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

Дифференциальный усилитель относится к разряду усилителей постоянного тока (УПТ), которые имеют специфический недостаток, затрудняющий усиление малых постоянных напряжений и токов и называемый дрейфом нуля. Дрейф нуля заключается в том, что с течением времени могут изменяться токи транзисторов и напряжение на их электродах. При этом нарушается, например, баланс моста в дифференциальном усилителе по постоянным составляющим коллекторных напряжений и на выходе появляется напряжение в отсутствие входного сигнала. Поскольку УПТ должен усиливать напряжение вплоть до самых низких частот, всякое изменение постоянных составляющих

щих напряжений $U_{кп}$, $U_{бп}$ из-за нестабильности источника питания E_k , «старения» транзисторов, изменения температуры окружающей среды и т. д. принципиально не отличается от полезного сигнала.

Дрейф нуля в УПТ можно наблюдать в таком опыте. Вход УПТ замыкается накоротко ($u_{вх}=0$), а на выходе включается милливольтметр (рис. 3.3, а), у которого ноль находится посередине шкалы. Вначале стрелка милливольтметра будет стоять

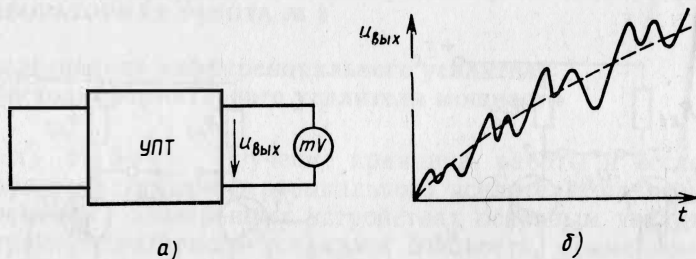


Рис. 3.3. Схема измерения дрейфа нуля в УПТ (а), временная зависимость дрейфа нуля в УПТ (б)

на нуле, но с течением времени из-за нестабильности напряжений $U_{кп}$, $U_{бп}$ и неточной их компенсации появляется выходное напряжение, примерная временная зависимость которого показана на рис. 3.3, б. При этом можно сказать, что ноль шкалы милливольтметра «дрейфует». Это выходное напряжение, деленное на коэффициент усиления усилителя, называют дрейфом, приведенным ко входу усилителя: $u_{др}=u_{вых}/K$ при $u_{вх}=0$.

Как видно из рис. 3.3, б, выходное напряжение состоит как бы из двух составляющих: медленно изменяющегося напряжения (штриховая линия) и переменного быстроизменяющегося напряжения. Первое называется медленным дрейфом и обуславливается в основном изменением характеристик транзисторов в течение длительного времени, второе — быстрым дрейфом и определяется колебаниями напряжения источника питания температуры окружающей среды и другими подобными внешними дестабилизирующими факторами.

В транзисторных усилителях обращают внимание в основном на быстрый дрейф, стабилизацию напряжения источника питания и температурную стабилизацию. При стабилизации напряжения источников питания с точностью $\pm 0,0001$ и температурной стабилизации с точностью $\pm 1^\circ\text{C}$ дрейф нуля $u_{др}$ удастся снизить до 5—20 мВ.

Медленный дрейф устраняется искусственным старением транзисторов, достигаемым их специальной многочасовой тренировкой.

В дифференциальном усилителе за счет баланса схемы эффективно снижается влияние всех дестабилизирующих факторов. В идеально сбалансированном дифференциальном усилителе (с одинаковыми транзисторами) дрейф нуля равен нулю.

Воздействие дестабилизирующих факторов на дифференциальный усилитель равнозначно подаче на оба входа напряжений одинаковых амплитуды и фазы. Подобные сигналы называют синфазными и обозначают $u_{\text{вх. сф}}$. Для оценки подавления синфазного сигнала вводят коэффициент ослабления синфазного сигнала

$$K_{\text{ос.сф}} = K_{U1,2} / K_{\text{сф}}, \quad (3.6)$$

где $K_{\text{сф}} = u_{\text{вых. сф}} / u_{\text{вх. сф}}$ — коэффициент усиления синфазного сигнала.

Этот коэффициент усиления можно определить экспериментально по схеме рис. 3.4.

Коэффициент $K_{\text{ос. сф}}$ выражается обычно в децибелах, т. е.

$$K_{\text{ос.сф}} = 20 \lg \frac{K_{U1,2}}{K_{\text{сф}}}. \quad (3.7)$$

При хорошем ослаблении синфазного сигнала $K_{\text{ос. сф}} = 10^4 \div \div 10^6$, что соответствует 80—120 дБ.

Дифференциальные усилители используются как основной элемент в операционных усилителях, компараторах, стабилизаторах или в виде отдельной типовой интегральной микросхемы (ИМС). При микроэлектронном исполнении приведенный дрейф нуля, вызванный, например, изменением температуры, равен примерно 1 мВ/град. В то же время при работе только одной из половин усилителя дрейф нуля составил бы около 2 мВ/град, т. е. возрос бы на три порядка. Столь малый дрейф нуля в дифференциальном усилителе микроэлектронного исполнения достигается за счет технологических и схемотехнических мер. К технологическим мерам относится выполнение в едином технологическом цикле всех элементов дифференциального усилителя, особенно транзисторов T_1 , T_2 и резисторов R_{K1} , R_{K2} . Поэтому их основные параметры и температурные свойства практически одинаковы, что обеспечивает максимальную симметрию в усилителе. Включение транзисторов T_3 , T_4 с резисторами $R_{Эз}$, $R_{Бз}$, R_{K4} (рис. 3.5) является схемотехнической мерой, направленной на большую температурную стабилизацию. Транзистор T_3 работает в режиме почти не изменяющегося тока при изменениях температуры. Такой режим обеспечивается, во-первых, выбором рабочей точки на пологом участке выходной характеристики транзистора, что достигается включением резисторов $R_{Эз}$, $R_{Бз}$ необходимого номинала, а во-вторых, наличием транзистора T_4 в диодном включении в базовой цепи транзистора T_3 , что компенсирует температурные смещения его входной характеристики.

Питание дифференциального каскада производится от двух источников питания $+E_K$ и $-E_K$ с равными напряжениями. Кроме создания отрицательного потенциала эмиттеров $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2$ источник питания $-E_K$ необходим для отделения компенсационным методом постоянных составляющих токов и напряжений, определяющих режим усиления транзисторов в усилителях, от полезного сигнала.

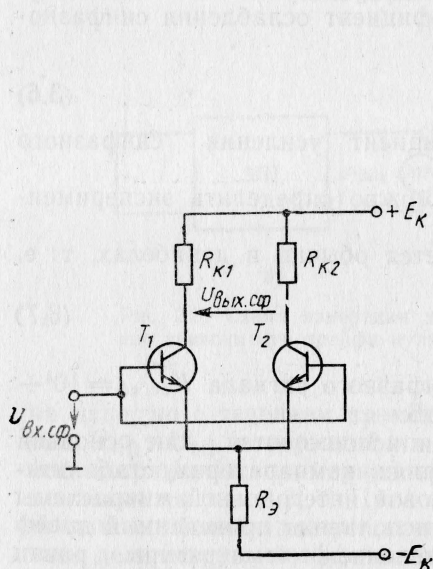


Рис. 3.4. Измерительная схема для определения коэффициента усиления $K_{сф}$

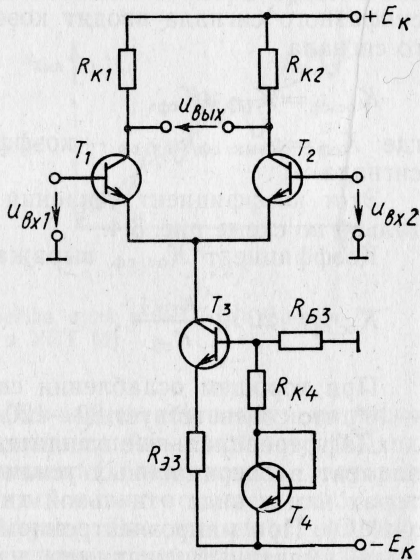


Рис. 3.5. Схема дифференциального усилителя в микроэлектронном исполнении

При питании усилителя от двух источников для анализа и расчета следует брать напряжение питания $2E_K$, поскольку по отношению к усилителю источники $+E_K$ и $-E_K$ включены последовательно. В настоящее время широко применяются дифференциальные усилители К118УД1, К122УД1, К175УВ и ряд других.

Бестрансформаторный усилитель мощности. Усилитель мощности является обычно выходным усилителем, предназначенным для передачи в нагрузочное устройство требуемой мощности, получение которой обеспечивается прежде всего выбором соответствующего транзистора. При выбранном транзисторе и заданном усиливаемом сигнале получение максимальной или заданной мощности в нагрузочном устройстве возможно только при соответствующем согласовании сопротивления нагрузочного устройства и выходного сопротивления усилителя мощности. Если необходимо получить максимальную мощность от усилите-

ля мощности, то требуется равенство указанных сопротивлений. Для согласования сопротивления нагрузочного устройства с выходным сопротивлением усилителя мощности применяют понижающий трансформатор или эмиттерный повторитель. В первом случае усилители называют трансформаторными, во втором — бестрансформаторными усилителями мощности.

Рис. 3.6. К пояснению режимов усиления А, В и АВ усилителя

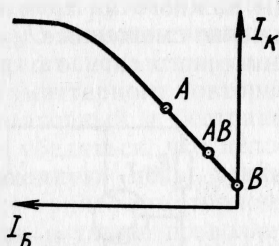
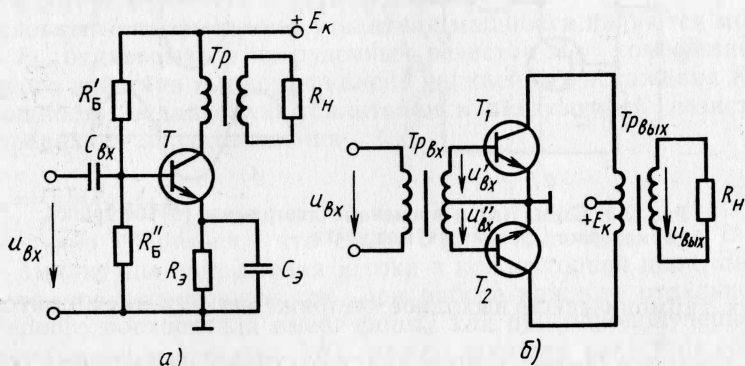


Рис. 3.7. Схемы одноконтного (а) и двухконтного (б) трансформаторных усилителей мощности



В усилителях мощности используют классы усиления А, В и АВ. При необходимости получения минимальных нелинейных искажений прибегают к классу усиления А (рис. 3.6). Но при этом коэффициент полезного действия η меньше 0,5, т. е. экономичность усилителя оказывается низкой. Для повышения КПД в усилителях мощности используют класс усиления В. В этом случае КПД может достигать 0,785, однако возрастают нелинейные искажения.

Представляет интерес также класс усиления АВ, когда рабочая точка на переходной характеристике рис. 3.6 лежит между рабочими точками классов А и В. В этом режиме КПД меньше, чем в классе В, но больше, чем в классе А. При работе в классе АВ нелинейные искажения меньше, чем в классе В, но несколько больше, чем в классе А.

При работе в классе А применяют одноконтные усилители мощности. На рис. 3.7, а изображена схема одноконтного трансформаторного усилителя мощности. Усилители класса В строят

по схеме двухтактного трансформаторного усилителя мощности (рис. 3.7, б).

В этих усилителях трансформаторы T_p и $T_{p_{вых}}$ служат для согласования нагрузочного сопротивления R_H с выходным сопротивлением усилителя мощности.

Класс усиления В в двухтактном усилителе мощности обеспечивается тем, что по постоянному току базовый и эмиттерный выводы каждого из транзисторов закорочены и, следовательно, напряжение смещения $U_{БП}$ равно нулю. С появлением входного гармонического сигнала транзисторы работают поочередно, об-

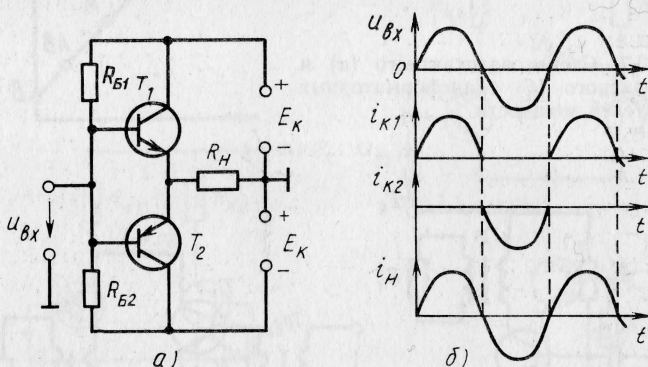


Рис. 3.8. Схема (а) и временные диаграммы (б) бестрансформаторного усилителя мощности

разуя гармоническое выходное напряжение из двух полусинусоид.

Сейчас все больше применяются бестрансформаторные усилители мощности. Их выполняют на дискретных элементах и в микроэлектронном виде. На рис. 3.8, а изображена одна из схем бестрансформаторного усилителя мощности. Этот усилитель также является двухтактным, но собирают его на транзисторах разных типов электропроводности: транзистор T_1 — типа $n-p-n$, а транзистор T_2 — типа $p-n-p$. Транзисторы включаются по схеме с общим коллектором, что и обеспечивает согласование нагрузочного резистора R_H с выходным сопротивлением усилителя.

В бестрансформаторных усилителях мощности необходимо, чтобы разнотипные транзисторы имели строго одинаковые параметры. Если усилитель выполняется на дискретных элементах, то следует пользоваться одной парой транзисторов, называемых комплементарными, выпускаемых промышленностью на различные выходные мощности (например, ГТ402—ГТ404, ГТ703—ГТ705, КТ814—КТ815, КТ818—КТ819).

Идентичность параметров разнотипных транзисторов в интегральных микросхемах соблюдается очень точно за счет техно-

логии их изготовления. В рассматриваемом усилителе применяется режим усиления АВ.

Работу бестрансформаторного усилителя мощности можно пояснить временными диаграммами. При положительной полуволне напряжения $u_{вх}$ (рис. 3.8, б) в нагрузочном резисторе R_n появляется ток $i_{н1}$, создаваемый транзистором T_1 типа $n-p-n$. При отрицательной полуволне напряжения $u_{вх}$ ток $i_{н2}$ создается транзистором T_2 типа $p-n-p$. Таким образом, в нагрузочном резисторе R_n форма тока i_n будет повторять форму входного сигнала (рис. 3.8, б). Анализ и расчет рассматриваемого усилителя сводятся к анализу и расчету отдельно каждого эмиттерного повторителя.

Сравнивая двухтактные трансформаторный и бестрансформаторный усилители мощности, можно убедиться, что непосредственное включение резистора R_n в выходную цепь усилителя устраняет вносимые трансформатором в трансформаторном усилителе частотные и фазовые искажения, а также позволяет избежать потерь мощности в трансформаторе.

Основными параметрами усилителя мощности являются мощность P_n , отдаваемая в нагрузочный резистор R_n , коэффициент полезного действия η и коэффициент нелинейных искажений $K_{ни}$.

Мощность, отдаваемую усилителем в нагрузочный резистор R_n , определяют из соотношения

$$P_n = 0,5 U_{nm} I_{nm}. \quad (3.8)$$

Нетрудно убедиться, что $U_{nm} = U_{km}$ и $I_{nm} = I_{km}$, где U_{km} , I_{km} — амплитуды напряжения и тока в коллекторной цепи. Зная I_{km} и то, что нагрузочный ток при работе каждого отдельного эмиттерного повторителя имеет форму как при однополупериодном выпрямлении (см. рис. 3.8), можно записать известное соотношение между средним и амплитудным значениями тока: $I_{н.ср} = I_{km}/\pi$.

Мощность, потребляемая усилителем от источника питания,

$$P_{потр} = 2E_K I_{Kср} = 2E_K I_{н.ср}. \quad (3.9)$$

Тогда КПД

$$\eta = \frac{P_n}{P_{потр}} = \frac{\pi}{4} \frac{U_{nm}}{E_K}. \quad (3.10)$$

В предельном случае, когда $U_{nm} = E_K$, наибольший КПД будет равен $\pi/4 = 0,785$.

Как известно, нелинейные искажения характеризуются появлением гармонических колебаний с частотами, отсутствующими во входном сигнале. Нелинейные искажения оценивают коэффициентом нелинейных искажений

$$K_{ни} = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2 / U_1}. \quad (3.11)$$

Здесь U_n , U_1 — действующие значения соответственно n -й и первой (основной) гармонических составляющих выходного напряжения.

Следует иметь в виду, что в большинстве практических случаев достаточно ограничиться влиянием на нелинейные искажения второй и третьей гармоник. Тогда

$$K_{\text{нн}} = \sqrt{(U_2^2 + U_3^2)/U_1}, \quad (3.11a)$$

где U_2 , U_3 — действующие значения второй и третьей гармонических составляющих выходного напряжения.

Для усилителей, работающих в области низких частот, $K_{\text{нн}} \approx 0,05 \div 0,1$.

Описание лабораторной панели

На лабораторной панели (см. рис. 2.15) расположены основные элементы дифференциального усилителя и бестрансформаторного усилителя мощности на комплементарных биполярных транзисторах. На панели расположен фильтр Φ , необходимый для измерения нелинейных искажений. Все типы усилителей находятся в полусобранном виде: линии, соединяющие условные графические обозначения активных и пассивных элементов, изображенных на панели, означают, что соответствующие части усилителей уже собраны.

Задание

А. Выполняется при подготовке к работе.

1. Начертить схемы включения дифференциального усилителя и бестрансформаторного усилителя мощности, указав на них необходимые измерительные приборы и электронный генератор.

Б. Выполняется в лаборатории.

1. Снять и построить амплитудную характеристику дифференциального усилителя при симметричном входе на частоте $f = 1$ кГц, определить динамический диапазон усилителя и коэффициент усиления $K_{U1,2}$, измерить входное и выходное сопротивления усилителя.

2. Снять и построить амплитудную характеристику дифференциального усилителя при несимметричном входе на частоте $f = 1$ кГц, определить коэффициент усиления K_U , динамический диапазон усилителя, входное и выходное сопротивления усилителя.

3*. Измерить коэффициент ослабления синфазного сигнала.

4. Собрать бестрансформаторный усилитель мощности, измерить базовые и коллекторные напряжения при $u_{\text{вх}} = 0$, сравнить их между собой.

5. При $f = 1$ кГц снять и построить амплитудную характеристику усилителя мощности и зависимость выходной мощности $P_{\text{н}}$

от входного напряжения $U_{вх}$, определить динамический диапазон и коэффициент усиления.

6. Измерить входное и выходное сопротивления усилителя.

7*. Снять зависимость коэффициента нелинейных искажений от входного сигнала.

Примечание. Пункты задания, обозначенные (*), выполняются факультативно.

Методические указания по выполнению лабораторной работы

1. Постоянные напряжения измеряют электронным вольтметром.

2. Входное усиливаемое напряжение подается с генератора низкой частоты (например, ГЗ-36А) на вход усилителей через конденсатор емкостью $C_{с1}=30$ мкФ. Входное напряжение измеряют вольтметром, установленным на генераторе, выходное напряжение — электронным вольтметром.

3. Симметрию в усилителях проверяют путем измерения постоянных составляющих напряжений $U_{БП}$ и $U_{КП}$. Различие соответствующих величин не должно превышать нескольких процентов.

4. Коэффициент ослабления синфазного сигнала определяют по формуле $K_{ос.сф}=20 \lg \frac{K_{U1,2}}{K_{сф}}$, $K_{U1,2}$ — коэффициент усиления дифференциального усилителя, определяемый в п. 1 задания; $K_{сф}$ — коэффициент усиления синфазного сигнала, определяемый по схеме рис. 3.3 как отношение выходного и входного напряжений, измеренных на частоте $f=1$ кГц.

5. Выходную мощность бестрансформаторного усилителя мощности рассчитывают по формуле $P_{н}=U_{н}^2/R_{н}$, где $U_{н}$ — действующее напряжение, измеренное вольтметром; $R_{н}$ — сопротивление нагрузочного резистора.

6. Измерения коэффициента нелинейных искажений осуществляют с помощью электронного вольтметра. Сначала измеряют действующее выходное напряжение, практически совпадающее с действующим напряжением первой гармонической составляющей. Действующее напряжение высших гармонических составляющих $U_{ВГ}$ измеряют электронным вольтметром, подключенным к выходу фильтра, подавляющего гармонику частотой 1 кГц. Коэффициент нелинейных искажений определяют по формуле $K_{ни}=U_{ВГ}/U_1$.

7. Амплитудную характеристику, зависимость $P_{н}=f(U_{вх})$ и $K_{ни}=f(U_{вх})$ для удобства анализа строят на одном графике.

Контрольные вопросы

1. Что такое дрейф нуля и каковы способы его снижения?

2. Что такое дифференциальный усилитель?

3. Чему равен коэффициент усиления дифференциального усилителя?
4. Почему входное сопротивление дифференциального усилителя $R_{вх} = 2h_{11}$?
5. Почему выходное сопротивление дифференциального усилителя $R_{вых} = 2R_k$?
6. Что такое коэффициент ослабления синфазного сигнала и как его определяют?
7. Как изменится коэффициент усиления дифференциального усилителя, если к выходу усилителя подключить резистор с сопротивлением, равным нескольким ом?
8. Какие особенности имеет усилитель мощности?
9. Можно ли нагрузочное устройство включить непосредственно в коллекторную цепь транзистора?
10. По каким причинам в усилителе мощности появляются нелинейные искажения?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

Исследование операционных усилителей

Цель работы. Ознакомление с характеристиками и параметрами операционных усилителей без обратной связи и с обратными связями. Исследование применений операционных усилителей в качестве избирательных усилителей, сумматоров, интеграторов и дифференциаторов.

Краткие теоретические сведения

Характеристики и параметры операционных усилителей. Операционным усилителем (ОУ) называют усилитель электрических сигналов, предназначенный для выполнения различных операций над аналоговыми и импульсными величинами при работе с обратными связями.

В настоящее время промышленность выпускает операционные усилители второго и третьего поколений, построенные по двухкаскадной схеме. Эти ОУ по своим основным параметрам значительно превосходят операционные усилители первого поколения, создаваемые по трехкаскадной схеме.

Основу всех ОУ составляют дифференциальные каскады. Первый каскад обеспечивает коэффициент усиления, достигающий нескольких сотен тысяч и единиц миллионов. Входной каскад, в котором часто используются полевые транзисторы, обеспечивает входные характеристики ОУ, в частности его высокое входное сопротивление. Выходным каскадом является бестрансформаторный двухтактный усилитель мощности (эмиттерный повторитель, работающий в режиме усиления В или АВ). Он служит для согласования высокого выходного сопротивления первого дифференциального каскада ОУ с низкоомным нагруз-

зочным устройством. Поэтому ОУ имеет низкое выходное сопротивление. Кроме того, в состав современных ОУ входят цепи защиты по входу от перенапряжений и по выходу от превышения выходного тока.

В настоящее время операционные усилители, изготавливаемые по интегральной технологии, являются самыми универсальными и массовыми аналоговыми устройствами. ОУ широко применяются не только в усилителях, но также в различных генераторах, преобразователях, стабилизаторах напряжения, компараторах, источниках эталонных напряжений, активных фильтрах, электронных ключах и т. д.

Широкие функциональные возможности при небольшом числе стандартных типов ОУ, выпускаемых промышленностью, достигаются за счет включения разнообразных внешних цепей обратных связей. Наибольшее распространение получили интегральные полупроводниковые ОУ, обладающие наименьшими габаритами и массой, способные работать в диапазоне температур от -60 до $+125^{\circ}\text{C}$. Они имеют коэффициент усиления 10^6 и более при усилении сигналов частотой от нуля до единиц мегагерц. На работу подобных ОУ весьма слабо влияют такие дестабилизирующие факторы, как изменения температуры и питающего напряжения. Современные ОУ относительно дешевы и доступны для широкого применения, что обеспечивается их массовым автоматизированным изготовлением. Надежность операционного усилителя, включающего в себя несколько сотен элементов и более, соответствует надежности отдельного транзистора, что обеспечивается интегральной технологией, при которой все элементы (транзисторы, диоды, резисторы и др.) и соединения между ними выполняются в едином технологическом цикле. Как показывает практика, срок службы хорошего полупроводникового интегрального ОУ может превысить 20 лет [2].

На рис. 4.1, а приведено условное обозначение операционного усилителя. Как видно, ОУ имеет два входа и один выход. Вход, напряжение на котором сдвинуто по фазе на 180° относительно выходного напряжения, называют *инвертирующим* и обозначают кружком. Второй вход является *неинвертирующим*, так как напряжение на нем и выходное напряжение совпадают по фазе.

Выводы, к которым подключаются источники питающего напряжения $+U_{и.п}$ и $-U_{и.п}$, а также вспомогательные цепи на принципиальных схемах обычно не обозначают. При необходимости выводы ОУ, к которым подключаются, например, источники напряжения, изображают так, как показано на рис. 4.1, б.

На рис. 4.2 изображена одна из важнейших характеристик — амплитудная (передаточная) характеристика ОУ, представляющая собой зависимость $U_{вых} = f(U_{вх})$ при нулевой частоте. Кривая 1 соответствует подаче входного напряжения на инвертирующий вход, кривая 2 — на неинвертирующий вход. Эти харак-

теристики получают при подаче входного напряжения на один из входов при отсутствии напряжения на другом входе.

Наклонный (линейный) участок кривых подчеркивает линейность зависимости $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$. Горизонтальные участки кривых соответствуют режиму работы ОУ, при котором входное напряжение выходит за пределы линейного участка передаточной характеристики.

Значения выходного напряжения $U_{\text{вых max}}^+$ и $U_{\text{вых max}}^-$, характеризующие эти участки, обычно на 1—2 В меньше напряжения питания.

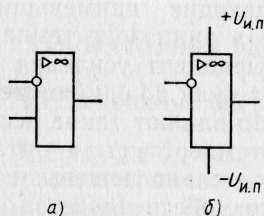


Рис. 4.1. Условное графическое обозначение операционного усилителя без источников питания (а) и с источником питания (б)

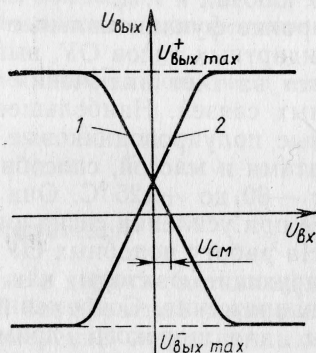


Рис. 4.2. Амплитудная (передаточная) характеристика ОУ

Операционный усилитель характеризуется теми же параметрами, что и другие усилители. Знание параметров интегральных ОУ позволяет быстро и грамотно спроектировать различные электронные блоки и устройства, а также предотвратить выход их из строя, т. е. работу в недопустимых режимах.

Современные ОУ имеют следующие основные параметры:

1. Коэффициент усиления K_U . Представляет собой отношение приращения выходного напряжения к вызвавшему его приращению входного напряжения. В современных ОУ K_U при нулевой частоте достигает значений от десятков и сотен тысяч до нескольких миллионов. По углу наклона линейного участка амплитудной характеристики определяют коэффициент усиления.

Коэффициент усиления ОУ зависит от изменения напряжения питания, тока нагрузочного устройства, температуры окружающей среды. По этой причине ОУ (за исключением компараторов) не применяют без цепей внешней обратной связи, которые стабилизируют коэффициент усиления.

2. Напряжение смещения $U_{см}$. Определяется входным напряжением, при котором выходное напряжение равно нулю (рис. 4.2). Напряжение смещения появляется вследствие разброса параметров элементов ОУ или изменений режимов работы входных транзисторов за счет рассогласования во входных цепях ОУ. Обычно в ОУ широкого применения $U_{см} = 5 \div 20$ мВ. Напряжение смещения зависит от температуры и напряжения источника питания. Изменение $U_{см}$ в зависимости от

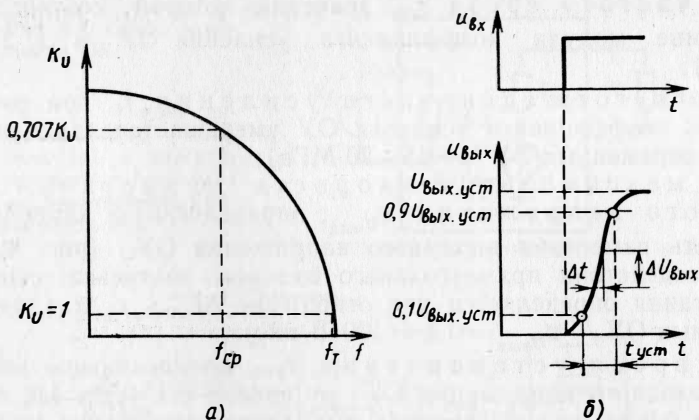


Рис. 4.3. Амплитудно-частотная характеристика ОУ (а), характеристики $u_{вых}(t)$ к объяснению параметра ОУ — скорости нарастания выходного напряжения $v_{U_{вых}}$ (б)

температуры для ОУ широкого применения составляет примерно 50 мкВ/град. Для устранения напряжения смещения на входе ОУ вводят специальные электрические цепи.

3. Входной ток $I_{вх}$. Это ток во входной цепи ОУ, который может составить 0—100 мкА. Его необходимо учитывать при подключении к обоим входам ОУ внешних электрических цепей. Если сопротивления внешних электрических цепей по инвертирующему и неинвертирующему входам неодинаковые, то разность падений напряжений на них вызовет дополнительные напряжения, складывающиеся с напряжением смещения. Для исключения этого сопротивления этих выводов стремятся сделать равными.

4. Входное сопротивление $R_{вх}$. Различают входные сопротивления для дифференциального сигнала ($R_{вх.д}$) и синфазного сигнала ($R_{вх.сф}$). Для получения большего входного сопротивления первый каскад ОУ выполняют на полевых транзисторах; $R_{вх.д}$ имеет значение от нескольких килоом для биполярных транзисторов до нескольких единиц и десятков мегаом для полевых транзисторов, а $R_{вх.сф} > 100$ МОм.

5. Выходное сопротивление $R_{вых}$. Это сопротивление, измеренное со стороны нагрузочного устройства, пред-

ставляет собой выходное сопротивление выходных каскадов ОУ, построенных на эмиттерных повторителях. Значения $R_{\text{вых}} = 20 \div 2000 \text{ Ом}$.

Усиление сигналов различных частот определяется амплитудно-частотной характеристикой ОУ (рис. 4.3, а), а усиление импульсных (обычно прямоугольных) сигналов скоростью нарастания выходного напряжения (рис. 4.3, б).

В соответствии с этим вводят динамические параметры ОУ:

1) частоту среза $f_{\text{ср}}$, значению которой соответствует снижение модуля коэффициента усиления ОУ в $\sqrt{2}$ раза (3 дБ);

2) частоту единичного усиления f_t , при которой модуль коэффициента усиления ОУ уменьшается до единицы (для современных ОУ $f_t = 15 \div 20 \text{ МГц}$);

3) максимальную скорость нарастания выходного напряжения $v_{U_{\text{вых}}}$, определяющую наибольшую скорость изменения выходного напряжения ОУ (рис. 4.3, б) при воздействии прямоугольного входного импульса; скорость нарастания определяется как отношение $\Delta U_{\text{вых}}$ к Δt (для современных ОУ $v_{U_{\text{вых}}} = 0,1 \div 100 \text{ В/мкс}$);

4) время установления $t_{\text{уст}}$, определяющее изменение выходного напряжения ОУ от уровня 0,1 (рис. 4.3, б) до уровня 0,9 от установившегося выходного напряжения при воздействии на вход прямоугольного импульса (для ОУ широкого применения $t_{\text{уст}} = 0,05 \div 2 \text{ мкс}$).

Одним из важных достоинств ОУ является подавление синфазных сигналов. Поэтому ОУ характеризуется коэффициентом ослабления синфазных сигналов $K_{\text{ос.сф}} = 201g (K_{\text{сф}}/K_U)$ (для ОУ общего назначения $K_{\text{ос.сф}} = 70 \div 120 \text{ дБ}$).

Выпускаемые в настоящее время интегральные ОУ классифицируют по следующим группам:

ОУ общего назначения, составляющие наиболее многочисленную группу универсальных ОУ;

прецизионные ОУ, позволяющие поддерживать с высокой точностью большой коэффициент усиления K_U ; они имеют высокое входное сопротивление и малое напряжение смещения ($U_{\text{см}} \leq 0,5 \text{ мВ}$); типичным прецизионным ОУ является интегральная микросхема 153УД5;

быстродействующие ОУ, характеризующиеся повышенной скоростью нарастания выходного напряжения и малым временем установления; они имеют частоту единичного усиления $15 - 20 \text{ МГц}$ (например, ОУ 140УД10 и КР544УД2);

микроомощные ОУ, потребляющие наименьшую энергию от источника питания (например, ОУ 140УД12, $I_{\text{пстр}} \leq 0,18 \text{ мА}$ при $U_{\text{и.п}} = \pm 6 \text{ В}$).

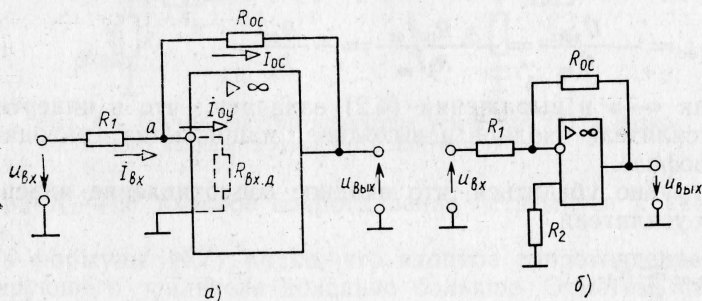
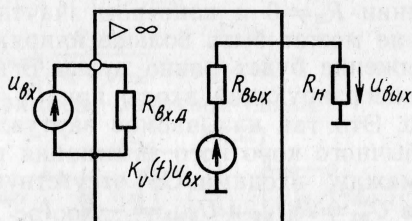
Наиболее широко используются ИМС серий 140 и 153.

Операционные усилители рассчитаны на применение симметричных разнополярных источников питания напряжением от ± 5 до ± 27 В. В настоящее время чаще всего используют напряжения ± 5 и ± 15 В с допускаемым отклонением $\pm (5 \div 10) \%$.

Применение подобных источников питания упрощает задачу компенсации смещения нуля ОУ и предотвращает появление ненужной постоянной составляющей тока в нагрузочном устройстве.

Рис. 4.4. Схема замещения ОУ.

Рис. 4.5. Схема инвертирующего усилителя (а) и инвертирующего усилителя с «выравнивающим» резистором (б)



Для анализа работы ОУ часто пользуются схемой замещения, изображенной на рис. 4.4. Входная часть схемы замещения определяется входным дифференциальным сопротивлением $R_{вх.д}$, а выходная часть содержит источник ЭДС $K_U(f)u_{вх}$ и резистивный элемент с сопротивлением $R_{вых}$.

Для удобства расчетов устройств с ОУ вводят понятие идеального ОУ, у которого:

коэффициент усиления стремится к бесконечности в бесконечно широкой полосе частот;

входное дифференциальное сопротивление $R_{вх.д}$ стремится к бесконечности;

выходное сопротивление $R_{вых}$ стремится к нулю;

выходное напряжение равно нулю при нулевом входном напряжении.

Применение операционных усилителей. При использовании ОУ в качестве инвертирующего усилителя (рис. 4.5, а) выходное напряжение сдвинуто по отношению к входному на 180° . Входное напряжение $U_{вх}$ подается на инвертирующий вход через резистор R_1 . С помощью резистора $R_{ос}$ осуществляется

отрицательная параллельная обратная связь по напряжению. Неинвертирующий вход усилителя при этом заземлен. В соответствии с первым законом Кирхгофа для узла a уравнение для токов записывается в виде

$$i_{\text{вх}} = i_{\text{ос}} + i_{\text{ОУ}}. \quad (4.1)$$

Анализ рассматриваемой схемы включения ОУ значительно упрощается при допущении, что ОУ идеален. Тогда при любом значении $R_{\text{н}} \neq 0$ и конечном значении выходного напряжения (оно не может быть больше напряжения питания ОУ) входное напряжение будет равно нулю. В этом случае инвертирующий и неинвертирующий входы при $U_{\text{вх}} = 0$ как бы замкнуты коротко. Это так называемое виртуальное замыкание. В отличие от обычного короткого замыкания при виртуальном замыкании ток между входами ОУ отсутствует, т. е. $i_{\text{ОУ}} = 0$ и $i_{\text{вх}} = i_{\text{ос}}$. Тогда $U_{\text{вх}} = R_1 i_{\text{вх}}$ и $U_{\text{вых}} = -R_{\text{ос}} i_{\text{ос}}$.

Коэффициент усиления инвертирующего усилителя

$$K_{U_{\text{ос}}} = - \frac{\dot{U}_{\text{вых}}}{\dot{U}_{\text{вх}}} = - \frac{R_{\text{ос}} i_{\text{ос}}}{R_1 i_{\text{вх}}} = - \frac{R_{\text{ос}}}{R_1}. \quad (4.2)$$

Знак «—» в выражении (4.2) означает, что в инвертирующем усилителе входное и выходное напряжения находятся в противофазе.

Нетрудно убедиться, что входное сопротивление инвертирующего усилителя

$$R_{\text{вх.ос}} \approx R_1. \quad (4.3)$$

Выходное сопротивление

$$R_{\text{вых.ос}} \approx \frac{R_{\text{вых}} (1 + R_{\text{ос}}/R_1)}{K_U}. \quad (4.3a)$$

При $K_U \rightarrow \infty$ значение $R_{\text{вых.ос}}$ будет стремиться к нулю. Для устранения различия сопротивлений во входных цепях по инвертирующему и неинвертирующему входам ОУ, вызванного подключением к инвертирующему входу резисторов R_1 , $R_{\text{ос}}$, в цепь неинвертирующего входа включают резистор $R_2 = R_1 R_{\text{ос}} / (R_1 + R_{\text{ос}})$ (рис. 4.5, б).

Если входной сигнал подать на неинвертирующий вход ОУ, а на инвертирующий вход с помощью цепи обратной связи R_1 , $R_{\text{ос}}$ подать часть выходного напряжения, т. е. осуществить последовательную отрицательную обратную связь по напряжению, то получится неинвертирующий усилитель (рис. 4.6, а). При таком виде обратной связи в соответствии со вторым законом Кирхгофа для входной цепи уравнение запишется так:

$$\dot{U}_{\text{вх}} = \dot{U}_0 + \dot{U}_{\text{вых}} \frac{R_1}{R_1 + R_{\text{ос}}}. \quad (4.4)$$

Вследствие «виртуального замыкания» инвертирующего и неинвертирующего входов $\dot{U}_0 = 0$ и тогда

$$\dot{U}_{\text{вх}} = \dot{U}_{\text{вых}} \frac{R_1}{R_1 + R_{\text{ос}}} \quad (4.5)$$

Коэффициент усиления неинвертирующего усилителя

$$K_{U_{\text{ос}}} = 1 + R_{\text{ос}}/R_1 \quad (4.6)$$

Входное сопротивление этого усилителя

$$R_{\text{вх.ос}} = R_{\text{вх.д}} (1 + \beta K_U) \approx R_{\text{вх.д}} \frac{R_1 K_U}{R_1 + R_{\text{ос}}} \quad (4.7)$$

где $\beta = R_1/(R_1 + R_{\text{ос}})$ — коэффициент обратной связи.

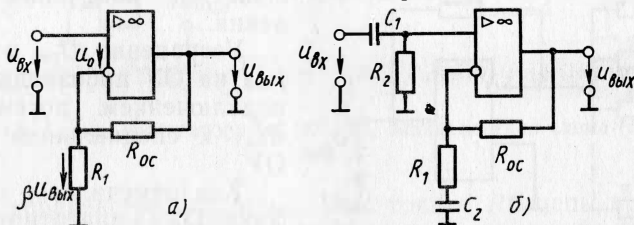


Рис. 4.6. Схемы неинвертирующего усилителя (а) и низкочастотного неинвертирующего усилителя (б)

При $K_U \rightarrow \infty$ входное сопротивление стремится к бесконечности.

Из формулы (4.7) видно, что входное сопротивление неинвертирующего усилителя довольно большое. Отметим, что значение $R_{\text{вх.ос}}$ у неинвертирующего усилителя значительно больше, чем у инвертирующего.

Выходное сопротивление неинвертирующего усилителя

$$R_{\text{вых.ос}} = R_{\text{вых}}/(1 + \beta K_U) \quad (4.8)$$

При $K_U \rightarrow \infty$ выходное сопротивление стремится к нулю.

Учитывая, что у неинвертирующего усилителя сопротивление $R_{\text{вх.ос}}$ очень большое, а $R_{\text{вых.ос}}$ мало, такой усилитель применяют часто как согласующий элемент при работе с высокоомным источником сигнала и низкоомным нагрузочным устройством.

Обычно для усилителей большое входное сопротивление не нужно, так как при этом они оказались бы весьма чувствительными к изменениям входного тока флуктуационного происхождения. Поэтому во входную цепь усилителя включают резистор $R_2 \ll R_{\text{вх.д}}$, который и должен определять входное сопротивление неинвертирующего усилителя. Значение сопротивления R_2 выбирают в пределах 0,5—1 МОм.

На рис. 4.6, б изображена схема низкочастотного неинвертирующего усилителя, в котором введена отдельная обратная

связь по переменной и постоянной составляющим. Для полезного (усиливаемого) сигнала коэффициент обратной связи $\beta = R_1/(R_1 + R_{oc})$, так как емкость конденсатора C_2 выбирают такой, чтобы можно было пренебречь его сопротивлением в частотном диапазоне усиливаемых напряжений ($X_{C_2} \ll R_1$ на самой нижней частоте частотного диапазона). Для постоянной составляющей, определяемой напряжением $U_{см}$, благодаря тому, что $X_{C_2} = \infty$, действует 100%-ная отрицательная обратная связь ($K_{U_{oc}} = 1$). Если не предусмотреть подавления напряжения смещения $U_{см}$, то транзисторы ОУ могут войти в режим насыщения,

что вызовет нелинейные искажения в работе усилителя и снижение коэффициента усиления.

Устранение $U_{см}$ в усилителях на ОУ производится чаще подключением потенциометра $R_{бал}$ к специальным выводам ОУ.

Как отмечалось, на основе двух ОУ — инвертирующего и неинвертирующего — при использовании различных цепей

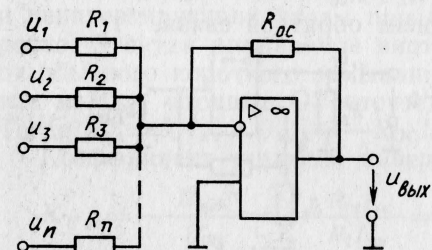


Рис. 4.7. Схема сумматора на ОУ

обратных связей строят разнообразные электронные устройства. На основе инвертирующего усилителя можно построить с у м м а т о р (рис. 4.7).

Если по-прежнему считать ОУ идеальным, то при подаче на инвертирующий вход ОУ через резисторы R_1, R_2, \dots, R_n входных напряжений U_1, U_2, \dots, U_n выходное напряжение в соответствии с выражением (4.2) будет равно сумме входных напряжений:

$$U_{вых} = -R_{oc}/R_0 (U_1 + U_2 + \dots + U_n), \quad (4.9)$$

где $R_0 = R_1' = R_1'' = \dots = R_n$, $R_0 < R_{вх.д.}$.

Если в инвертирующем усилителе (см. рис. 4.5) резистор R_{oc} заменить конденсатором C_{oc} , то получится интегратор (рис. 4.8, а). Действительно, $u_{вх} = R_1 i_{вх}$, а $u_{вых} = u_C$. Так как

$$i_{вх} = -i_{oc} = -C_{oc} \frac{du_{вых}}{dt}, \text{ то } u_{вх}/R_1 = -C_{oc} \frac{du_{вых}}{dt}.$$

Следовательно,

$$u_{вых} = -\frac{1}{R_1 C_{oc}} \int u_{вх} dt. \quad (4.10)$$

При замене резистора R_1 конденсатором C_1 схема рис. 4.5 превращается в схему дифференциатора (рис. 4.9, а).

Так как $u_{вх} = u_C$, а $u_{вых} = -R_{oc} i_{oc}$, то, учитывая, что $i_{oc} = C_1 \frac{du_{вх}}{dt}$,

получим

$$u_{\text{вых}} = -R_{\text{oc}} C_1 \frac{du_{\text{вх}}}{dt}. \quad (4.11)$$

Как известно из электротехники, в интегрирующих и дифференцирующих RC -цепях степень точности интегрирования и дифференцирования входного сигнала зависит от степени вы-

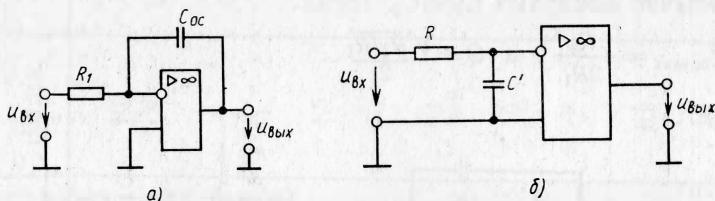


Рис. 4.8. Схема интегратора на ОУ (а), эквивалентная схема (б)

полнения неравенства $u_{\text{вых}} \ll u_{\text{вх}}$. Чем точнее RC -цепь производит ту или иную названную операцию, тем меньше должно быть выходное напряжение. Нетрудно убедиться, что интегратор на ОУ эквивалентен интегрирующей RC' -цепи (рис. 4.8, б), где $C' = CK_U$, напряжение с выхода которой усиливается ОУ в K_U раз.

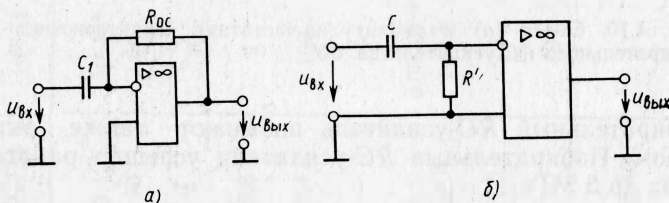


Рис. 4.9. Схема дифференциатора на ОУ (а), эквивалентная схема (б)

Также можно проанализировать работу дифференциатора на ОУ, схема которого эквивалентна дифференцирующей $R'C$ -цепи (рис. 4.9, б), где $R' = R/K_U$, напряжение с выхода которой усиливается ОУ в K_U раз.

Интеграторы и дифференциаторы на ОУ в настоящее время полностью вытеснили соответствующие RC -цепи из импульсной и вычислительной техники из-за более высокой точности.

Если ввести интегродифференцирующую обратную связь в ОУ, как показано на рис. 4.10, а, то получится избирательный RC -усилитель. Такой усилитель на частоте квазирезонанса

$f_0 = 1/(2\pi R_1 R_2 C_1 C_2)$ имеет максимальный коэффициент усиления (рис. 4.10, б), определяемый по формуле

$$K_{ос\max} = R_2 C_2 / R_1 (C_1 + C_2). \quad (4.12)$$

Добротность данного усилителя

$$Q = \frac{\sqrt{R_2/R_1} C_1 C_2}{C_1 + C_2}. \quad (4.13)$$

Обычно выбирают $C_1 = C_2$. Тогда

$$K_{ос\max} = \frac{R_2}{2R_1}, \text{ а } Q = \frac{\sqrt{R_2/R_1}}{2}. \quad (4.14)$$

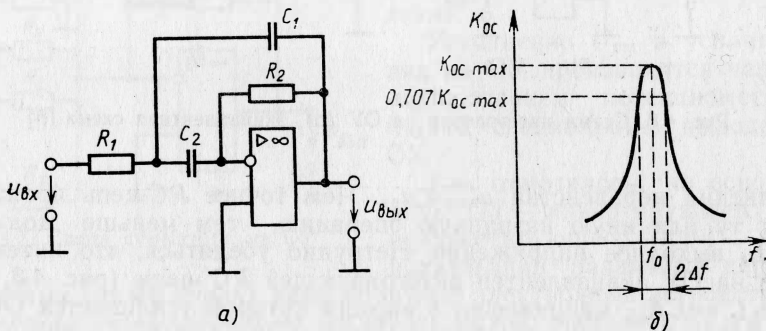


Рис. 4.10. Схема (а) и амплитудно-частотная характеристика (б) избирательного RC-усилителя на ОУ

Избирательный RC-усилитель называют также активным фильтром. Избирательные RC-усилители успешно работают на частотах до 5 МГц.

Описание лабораторной панели

На лабораторной панели (рис. 4.11) расположены: 1) операционный усилитель, тип и паспортные данные которого приведены в табл. 4.1; 2) цепи обратной связи, выполненные в виде отдельных блоков, включающих несколько резисторов и конденсаторов, подключение которых к ОУ создает инвертирующий и неинвертирующий усилители; 3) цепи обратной связи, подключение которых к ОУ создает исследуемое устройство: сумматор, дифференциатор, интегратор, избирательный RC-усилитель. В качестве цепи обратной связи в избирательном усилителе используется интегродифференцирующее звено.

Таблица 4.1

Параметры	Тип ОУ						
	140УД7, 1408УД2	140УД8	153УД2	153УД3, 140УД9	153УД5А	544УД1	154УД1
Коэффициент усиления K_U	$50 \cdot 10^3$	$50 \cdot 10^3$	$50 \cdot 10^3$	$35 \cdot 10^3$	10^6	$50 \cdot 10^3$	$200 \cdot 10^3$
Коэффициент ослабления синфазного сигнала $K_{ос.сф}$, дБ	70	90	65	80	120	80	80
Напряжение смещения нуля $U_{см}$, мВ	4	20	5	2	1	15	5
Частота единичного усиления f_T , МГц	0,8	1	3	1	1	15	1
Входное сопротивление $R_{вх.д}$, МОм, не менее	0,4	100	0,3	0,3	1,5	101	10
Выходное сопротивление $R_{вых}$, Ом	—	—	—	—	—	200	200
Входной ток $I_{вх}$, мкА	0,2	$0,05 \cdot 10^{-3}$	0,4	0,2	0,1	$1,5 \cdot 10^{-4}$	0,02
Сопротивление нагрузки R_n , кОм	≥ 2	≥ 2	≥ 2	≥ 2	≥ 2	≥ 2	≥ 2
Максимальное выходное на- пряжение $U_{вых\ max}$, В	11,5	10	11	10	10	10	12
Максимальное входное син- фазное напряжение $U_{вх\ max\ сф}$, В	11	10	12	6	—	10	—
Скорость нарастания выход- ного напряжения $\nu_{U_{вых}}$, В/мкс	До 10	3	0,5	5	0,2	2	10
Напряжение источника пита- ния $U_{и.п.}$, В	15	15	15	15	10	15	5; 15
Потребляемый ток $I_{потр}$, мА	3	5	3	3,6	3,5	3,5	0,15

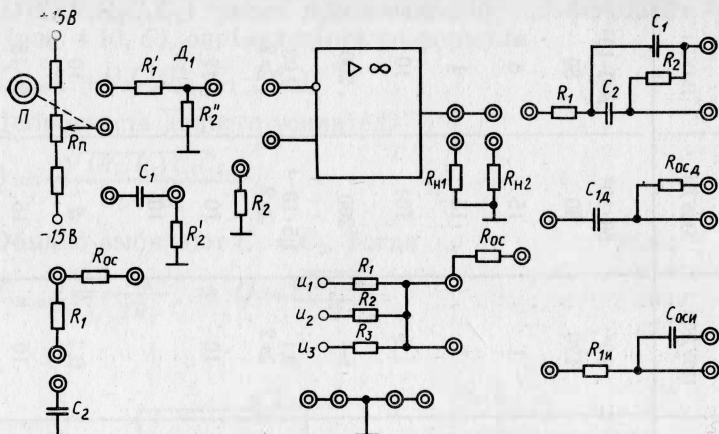


Рис. 4.11. Схема испытательной панели лабораторного стенда

Задание

А. Выполняется при подготовке к работе.

1. Ознакомиться со свойствами и электрическими параметрами ОУ в табл. 4.1.

2. Начертить схемы для проведения исследований, показав в них включение необходимых приборов.

3. Рассчитать сопротивление $R_{ос}$ инвертирующего и неинвертирующего усилителей. Исходные данные для расчета представлены в табл. 4.2 в соответствии с номером бригады.

Таблица 4.2

Параметры	Номер бригады									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Тип ОУ									
	140 УД8	140 УД7	153 УД3	1408 УД2	140 УД8	153 УД3	154 УД1	140 УД8	544 УД1	140 УД7
Коэффициент усиления $K_{Уос}$ Сопротивление R_1 , кОм	30	50	70	100	80	60	40	20	50	90
	10	13	5,1	3,9	8,2	7,5	10,0	15	12	6,2

4. Рассчитать частоту квазирезонанса избирательного усилителя с интегродифференцирующим звеном. Значения сопротивлений резисторов и емкостей конденсаторов взять из табл. 4.3 в соответствии с номером бригады.

Номер бригады	Параметры интегрирующего звена			Номер бригады	Параметры интегрирующего звена		
	R_1 , кОм	R_2 , кОм	$C_1=C_2$, нФ		R_1 , кОм	R_2 , кОм	$C_1=C_2$, нФ
1	1,0	18	68,0	6	1,3	68	33,0
2	2,0	56	18,0	7	1,0	62	48,0
3	1,5	82	10,0	8	1,6	10	5,1
4	1,1	33	22,0	9	7,5	56,0	22,0
5	1,2	75	7,5	10	8,2	100	51,0

Б. Выполняется в лаборатории.

1. Включить ОУ заданного типа без обратной связи (рис. 4.12, а) и провести следующие исследования:

а) снять и построить амплитудную характеристику ОУ $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$, определить по ней напряжение смещения $U_{\text{см}}$ и коэффициент усиления $K_U = \Delta U_{\text{вых}} / \Delta U_{\text{вх}}$, сравнить их с паспортными данными;

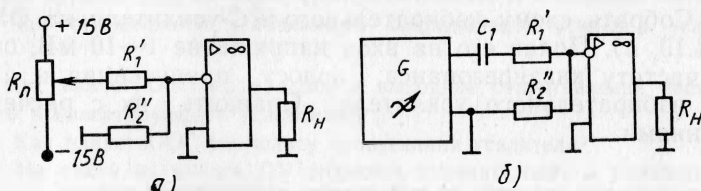


Рис. 4.12. Схемы включения ОУ без обратной связи для снятия амплитуды

б) снять амплитудно-частотную характеристику, включив ОУ по схеме рис. 4.12, б, определить частоты среза $f_{\text{ср}}$ и единичного усиления $f_{\text{т}}$, сравнить их с паспортными данными.

2. Включить ОУ по схеме инвертирующего (или неинвертирующего) усилителя (рис. 4.13, а, б) и провести следующие исследования:

а) на рабочей частоте $f=1$ кГц снять амплитудную характеристику при $R_{\text{н}}=1$ и 10 кОм, определить динамический диапазон, коэффициенты усиления $K_{U_{\text{ос}}}$ усилителя; сравнить их с расчетными значениями;

б) при $U_{\text{вх}}=1 \div 10$ мВ определить полосу пропускания усилителя.

3. Собрать схему сумматора на ОУ (см. рис. 4.7). Подав на его вход напряжения U_1 , U_2 и U_3 , убедиться, что на выходе

будет напряжение $U_{\text{вых}} = -K_{U_{\text{ос}}} (U_1 + U_2 + U_3)$. Определить экспериментальную погрешность суммирования.

4. Собрать схему интегратора на ОУ (см. рис. 4.8). Подав на его вход импульсы прямоугольной формы, снять осциллограмму выходного напряжения, измерив максимальные значения входного и выходного напряжений и скорость нарастания напряжения $v_{U_{\text{вых}}}$.

5. Собрать схему дифференциатора на ОУ (см. рис. 4.9). Подав на его вход импульсы прямоугольной формы, снять ос-

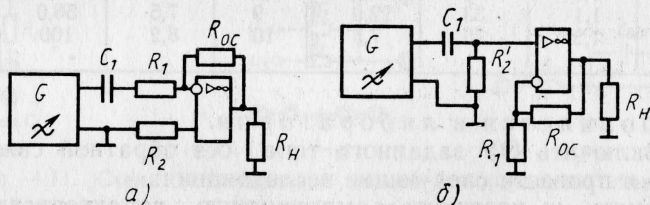


Рис. 4.13. Схемы включений инвертирующего (а) и неинвертирующего (б) усилителей

циллограмму выходного напряжения, измерить максимальные значения входного и выходного напряжений.

6. Собрать схему избирательного RC-усилителя на ОУ (см. рис. 4.10, а). Подав его на вход напряжение 1—10 мВ, определить частоту квазирезонанса, полосу пропускания и добротность избирательного усилителя. Сравнить их с расчетными значениями.

Методические указания по выполнению лабораторной работы

1. Амплитудную характеристику ОУ без обратной связи снимают при $R_N = \infty$. При снятии амплитудной характеристики усилителя на вход подают постоянное регулируемое напряжение U_1 с потенциометра Π через калиброванный делитель D_1 , коэффициент передачи которого $\alpha = 10^{-3}$. Напряжение $U_{\text{см}}$ определяют в режиме, когда $U_{\text{вых}} = 0$.

2. Для снятия амплитудно-частотной характеристики усилителя входное напряжение, равное 1—10 мВ, подают с генератора низкой частоты (например, ГЗ-36А). Для определения частоты среза $f_{\text{ср}}$ ОУ необходимо изменять частоту генератора низкой частоты до тех пор, пока напряжение $U_{\text{вых}}$ усилителя не станет равным $0,707 U_{\text{вых}}$, снятому при $f = 0$.

3. Для определения полосы пропускания избирательного усилителя необходимо измерить на частоте квазирезонанса выходное напряжение, которое при этом имеет наибольшее значение. Изменяя частоту входного напряжения с помощью ручки установки частоты генератора низкой частоты, определяют

граничные частоты f_n и f_v полосы пропускания, на которых выходное напряжение усилителя уменьшается в $\sqrt{2}$ раз.

4. Амплитуду входных и выходных напряжений, длительность импульсов, частоту генерации, скорость нарастания выходного напряжения в интеграторе и дифференциаторе определяют с помощью осциллографа.

5. При проведении экспериментов с дифференциатором частоты подаваемых прямоугольных импульсов должна быть в диапазоне нескольких сотен герц — единиц килогерц, а при работе с интегратором — нескольких килогерц.

Контрольные вопросы

1. Из каких каскадов состоят ОУ?
2. Для чего включают обратные связи в ОУ?
3. Чем определяется полоса пропускания ОУ?
4. По каким формулам определяют коэффициент усиления инвертирующего и неинвертирующего ОУ?
5. Какова форма выходного напряжения в усилителе переменного напряжения при входном напряжении, значение которого выходит за пределы динамического диапазона?
6. Чем определяется в ОУ амплитуда выходного напряжения $U_{\text{вых max}}^{\pm}$?
7. Как влияет на параметры и характеристики усилителя изменение напряжения питания $U_{\text{и.п.}}$?
8. Чем определяется стабильность коэффициента усиления усилителя $K_{u \text{ ос}}$?
9. Как влияет ООС на входное и выходное сопротивления неинвертирующего и инвертирующего усилителей?
10. Как влияет ООС на полосу пропускания усилителя?
11. На какой из входов ОУ подаются отрицательная и положительная обратные связи?
12. Чем определяется погрешность интегрирования и дифференцирования соответственно интегратора и дифференциатора на ОУ?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

Исследование автогенераторов синусоидальных колебаний

Цель работы. Изучение и исследование характеристик некоторых типов автогенераторов синусоидальных колебаний.

Краткие теоретические сведения

Автогенератор — устройство для получения электрических колебаний определенной частоты и формы за счет энергии источника постоянного или переменного тока.

В зависимости от устройства и назначения автогенератора частота колебаний может лежать в пределах от долей герц до 10^{11} — 10^{12} Гц. По форме генерируемых колебаний различают ге-

нераторы гармонических (синусоидальных) и релаксационных (несинусоидальных) колебаний.

Многие автогенераторы строят в соответствии с функциональной схемой, изображенной на рис. 5.1. Незатухающие колебания в автогенераторе поддерживаются за счет энергии источника питания. Усилитель с коэффициентом усиления $K = Ke^{i\varphi}$ регулирует поступление энергии из источника питания. Через цепь положительной обратной связи с коэффициентом

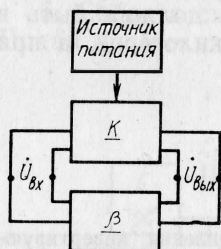


Рис. 5.1. Функциональная схема автогенератора

передачи $\beta = \beta e^{i\psi}$ напряжение определенных значений и фазы, необходимое для поддержания незатухающих колебаний, поступает с выхода усилителя на его вход.

Вследствие нелинейности характеристик усилительного элемента коэффициент усиления при увеличении входного напряжения начинает уменьшаться, если амплитуда входного напряжения превысит некоторое значение. 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 появится напряжение $K\tilde{U}_{вх}$, а на выходе цепи обратной связи — напряжение $K\tilde{U}_{вх}\beta$. Если

$$K\beta = 1, \quad (5.1)$$

т. е.

$$K\beta = 1 \quad (\text{условие баланса амплитуд}) \quad (5.2)$$

$$\varphi + \psi = 2\pi n, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (\text{условие баланса фаз}), \quad (5.2a)$$

то напряжение на выходе цепи обратной связи будет одинаково по значению с напряжением внешнего источника $\tilde{U}_{вх}$, совпадая с ним по фазе. Если замкнуть цепь обратной связи, то устройство начнет работать как автогенератор. Поэтому выражение (5.1) является условием существования незатухающих (стационарных) колебаний в автогенераторе. При $\beta < 1/K$ напряжение на выходе цепи обратной связи слишком мало, напряжение на выходе уменьшается и колебания исчезают. При $\beta > 1/K$ напряжение на выходе увеличивается до тех пор, пока нелинейность характеристики усилителя не приведет к уменьшению K до значения, при котором выполняется условие (5.2).

Если условие (5.1) выполняется для одной частоты, то автогенератор является генератором гармонических колебаний, если для полосы частот, то в генераторе возникают несинусоидальные колебания.

В зависимости от используемого усилительного элемента (интегральные микросхемы, транзисторы или электронные лампы) различают полупроводниковые и ламповые автогенераторы,

в зависимости от применяемых пассивных элементов (индуктивные катушки и конденсаторы или резисторы и конденсаторы) — LC - и RC -автогенераторы. В некоторых случаях (большая выходная мощность, работа при высоких температурах или уровнях радиации) используют ламповые автогенераторы, но чаще автогенераторы строят на полупроводниковых приборах или интегральных микросхемах. Более стабильные по частоте LC -автоге-

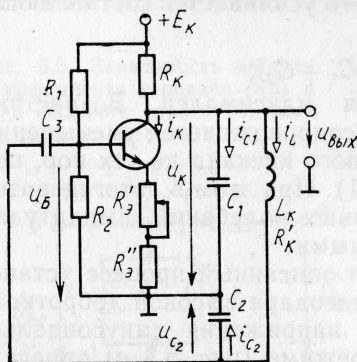


Рис. 5.2. Принципиальная схема LC -автогенератора на биполярном транзисторе

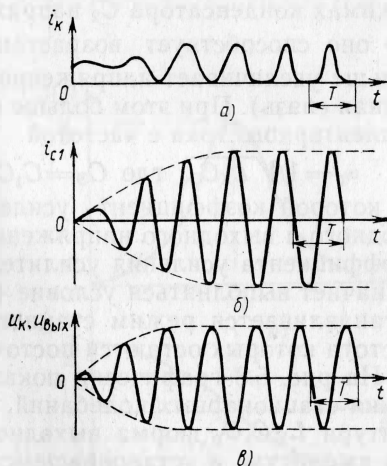


Рис. 5.3. Графики, поясняющие процесс установления коллекторного тока транзистора (а), тока в емкостном элементе (б) и выходного напряжения (в)

нераторы служат для получения синусоидального напряжения частотой от десятков килогерц до сотен мегагерц.

Для частот 10—50 кГц LC -автогенератор создать трудно, так как добротность индуктивных катушек на этих частотах мала. Поэтому для получения синусоидальных колебаний частотой от единиц герц до сотен килогерц используют RC -автогенераторы. Они имеют меньшую стабильность частоты, но являются более простыми и дешевыми.

LC -автогенераторы. В работе изучается автогенератор на биполярном транзисторе, собранный по емкостной трехточечной схеме (рис. 5.2). Резонансный усилитель (схема ОЭ) с контуром $L_k C_1 C_2$, частично включенным в коллекторную цепь транзистора с помощью конденсатора C_1 , охвачен положительной обратной связью. Напряжение обратной связи \dot{U}_C подается в базовую цепь транзистора с конденсатора C_2 . Резисторы $R_k, R_1, R_2, R_3 = R'_3 + R''_3$ обеспечивают нормальный режим работы транзистора по постоянному току. За счет введения небольшой отрицательной обратной связи, обусловленной наличием резисторов

R'_Σ , R'_Σ , и ее регулировки (R'_Σ) можно в некоторой степени регулировать амплитуду выходного напряжения. Конденсатор C_3 разделительный.

При включении источника питания $+E_K$ в коллекторной цепи транзистора появляется ток i_K (рис. 5.3, а), а также токи i_{C_1} , i_{C_2} (рис. 5.3, б) и ток i_L в элементах контура. Ток i_{C_2} создает на зажимах конденсатора C_2 напряжение u_{C_2} , фаза которого такова, что оно способствует возрастанию токов i_K , i_{C_1} , i_{C_2} , что еще больше увеличивает напряжение u_{C_2} и т. д. (положительная обратная связь). При этом больше всего усиливается составляющая коллекторного тока с частотой

$$\omega_0 = 1/\sqrt{L_K C_\Sigma}, \text{ где } C_\Sigma = C_1 C_2 / (C_1 + C_2),$$

на которой коэффициент усиления максимален. Возрастание входного и выходного напряжений сопровождается уменьшением коэффициента усиления усилительного каскада до тех пор, пока не начнет выполняться условие (5.1). При этом в автогенераторе устанавливается режим стационарных колебаний, амплитуда и частота которых остаются постоянными.

На рис. 5.3 графически показан описанный процесс установления стационарных колебаний. Благодаря высокой добротности контура $L_K C_1 C_2$ форма выходного напряжения синусоидальна, его амплитуда в установившемся режиме (рис. 5.3, в) определяется ЭДС источника питания $+E_K$, коэффициентом обратной связи β , параметрами транзистора (h_{11} , h_{21} , h_{22}) и контура (L_K , C_1 , C_2) и активным сопротивлением катушки R'_K . Регулировка амплитуды колебаний автогенератора производится изменением напряжения источника ЭДС $+E_K$ или сопротивления резистора R'_Σ . Частота колебаний определяется по формуле

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_K \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}}}. \quad (5.3)$$

Регулировка частоты осуществляется изменением параметров контура $L_K C_1 C_2$.

Коэффициент обратной связи β — это отношение входного напряжения усилителя $\dot{U}_{вх} = \dot{U}_B = \dot{U}_{C_2}$ к напряжению на выходе автогенератора $\dot{U}_{вых} = \dot{U}_K = \dot{U}_{C_1}$:

$$\beta = \frac{\dot{U}_{C_2}}{\dot{U}_{C_1}} \approx \frac{Z_{C_1} \dot{I}_{C_1}}{-Z_{C_2} \dot{I}_{C_1}} = -\frac{C_2}{C_1} = \frac{C_2}{C_1} e^{j\pi}. \quad (5.4)$$

Если учесть, что коэффициент усиления усилительного каскада на резонансной частоте ω_0 имеет фазовый угол $\varphi = -\pi$, то сумма фазовых углов [см. условие (5.2а)] будет равна нулю, т. е. баланс фаз будет выполняться только для одной частоты.

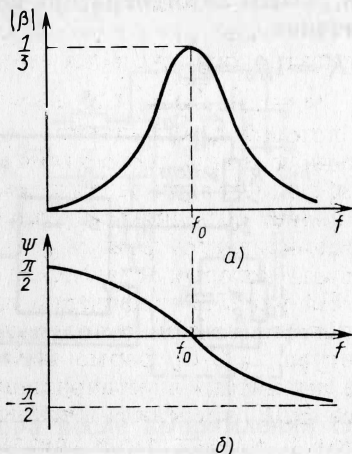
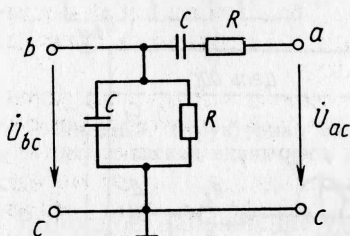
RC-автогенераторы. Рассмотрим RC-генератор синусоидальных колебаний с мостом Вина, схема которого изображена на рис. 5.4. Если считать, что к входным зажимам ac моста Вина приложено напряжение \dot{U}_{ac} с частотой $\omega = 2\pi f$, то для напряжения \dot{U}_{bc} на выходных зажимах моста можно записать

$$\dot{U}_{bc} = \dot{U}_{ac} \frac{\omega_*}{3\omega_* - j(1 - \omega_*^2)}, \quad (5.5)$$

где $\omega_* = \omega/\omega_0$; $\omega_0 = 1/(CR)$.

Рис. 5.4. Схема моста Вина

Рис. 5.5. Зависимость модуля коэффициента передачи $\beta(a)$ и угла фазового сдвига $\psi(b)$ моста Вина от частоты



На основании формулы (5.5) коэффициент передачи моста Вина $\underline{\beta} = \dot{U}_{bc}/\dot{U}_{ac} = \beta e^{j\psi}$, где

$$\beta = \frac{\omega_*}{\sqrt{(3\omega_*)^2 + (1 - \omega_*^2)^2}}; \quad (5.6)$$

$$\operatorname{tg} \psi = (1 - \omega_*^2)/3\omega_*. \quad (5.7)$$

На рис. 5.5 приведена зависимость модуля коэффициента передачи $|\beta|$ и угла фазового сдвига ψ от частоты. На частоте $f_0 = 1/(2\pi CR)$, называемой частотой квазирезонанса, коэффициент передачи β имеет максимальное значение:

$$\beta_0 = 1/3, \quad (5.8)$$

а фазовый сдвиг ψ между входным и выходным напряжениями равен нулю. Можно показать, что эквивалентная добротность моста Вина $Q_{\text{эк}} = 1/3$.

Для самовозбуждения усилителя с мостом Вина в цепи обратной связи необходимо, чтобы усилитель обладал достаточным коэффициентом усиления для компенсации потерь напряжения в цепи обратной связи; кроме того, угол фазового сдвига между выходным и входным напряжениями усилителя должен быть ра-

вен нулю. Этим условиям удовлетворяет неинвертирующий усилитель на ОУ с мостом Вина в цепи положительной обратной связи (ПОС) (рис. 5.6). Частота генерируемых синусоидальных колебаний

$$f_0 = 1/(2\pi CR). \quad (5.9)$$

Частоту колебаний можно изменять с помощью переменных резисторов.

Согласно выражениям (5.2), (5.8), для обеспечения нормальной работы автогенератора коэффициент усиления должен иметь значение

$$K = 1/\beta_0 = 3. \quad (5.10)$$

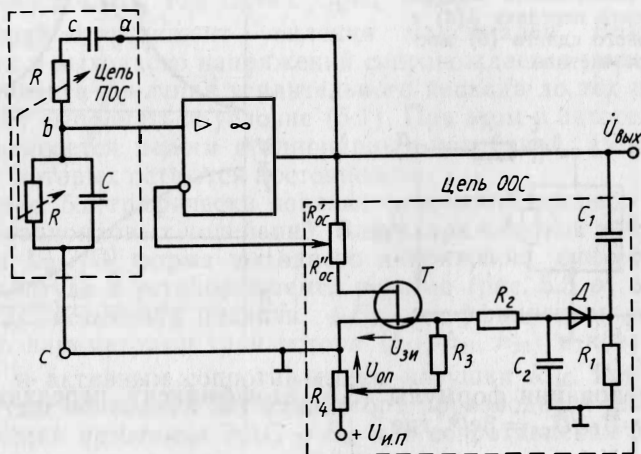


Рис. 5.6. Схема RC-автогенератора на операционном усилителе

Такой незначительный коэффициент усиления можно легко реализовать с помощью нелинейной цепи отрицательной обратной связи (ООС) ($R_{oc}' > 2R_{oc}''$, рис. 5.6). Если предположить, что сопротивление канала сток — исток полевого транзистора $r_{си} = 0$, то

$$K = 1 + R_{oc}'/R_{oc}'' > 3. \quad (5.10a)$$

Таким образом, в случае $r_{си} = 0$ при включении автогенератора будут возрастать колебания с частотой $f_0 = 1/(2\pi CR)$, на которой максимальна положительная обратная связь (ПОС). Это возрастание будет ограничиваться только нелинейностью выходной характеристики ОУ (уменьшением коэффициента усиления при большом входном напряжении). Ввиду малой добротности цепи ПОС форма выходного напряжения получается не синусоидальной (большое содержание высших гармоник). Для

улучшения формы выходного напряжения необходимо автоматически поддерживать условие (5.10) на линейном участке выходной характеристики ОУ. С этой целью вводят цепь нелинейной ООС, в которой полевой транзистор используется как элемент с переменным сопротивлением $r_{си}$ (рис. 5.6). Сопротивление канала $r_{си}$ возрастает, если напряжение затвора $U_{зи}$ становится более отрицательным. Начальным положением движка потенциометра регулируют значения сопротивлений $R'_{ос}$ и $R''_{ос}$ таким образом, чтобы $K = 1 + R'_{ос}/(R''_{ос} + r_{си}) = 3$ при некотором фиксированном значении напряжения $U_{зи} < 0$.

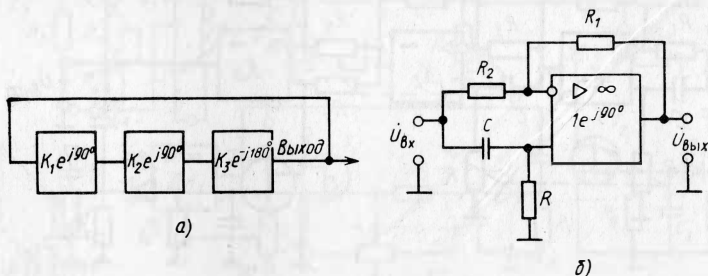


Рис. 5.7. Структурная схема трехкаскадного автогенератора (а) и каскад единичного усиления (б)

Выходное напряжение генератора после выпрямления сглаживается фильтром $C_2 R_2 R_3$, в результате чего получается постоянное отрицательное управляющее напряжение, пропорциональное амплитуде колебаний. В момент включения генератора это управляющее напряжение равно нулю, напряжение на затворе $U_{зи} = U_{оп} > 0$, сопротивление $r_{си}$ мало и коэффициент усиления

$$K = 1 + R'_{ос}/(R''_{ос} + r_{си}) > 3.$$

Колебания автогенератора нарастают до тех пор, пока выпрямленное напряжение не превысит значение $U_{оп}$. При этом напряжение $U_{зи} = U_{оп} - U_{R_3} < 0$, сопротивление $r_{си}$ возрастает, пока не начнет выполняться условие (5.2). Конденсатор C_1 разделительный. Для повышения эффективности регулировки в цепь ООС вводят усилитель, что еще больше улучшает форму выходного напряжения.

ОУ позволяют реализовать схемы автогенераторов с улучшенной формой напряжения. Одна из таких структурных схем представлена на рис. 5.7, а. Она содержит два усилителя с коэффициентами усиления $K_1 e^{j90^\circ}$ и $K_2 e^{j90^\circ}$ и инвертирующий каскад с коэффициентом усиления $K_3 e^{-j180^\circ}$. Таким образом, результирующий коэффициент передачи замкнутой цепи $K_1 K_2 K_3 e^{j(90^\circ + 90^\circ - 180^\circ)} = K e^{j0^\circ}$. Если выбрать $K_1 = K_2 = K_3 = 1$ (каскады единичного усиления), то такая схема будет являться автогенератором, его выходное напряжение имеет частоту, на которой

выполняется баланс амплитуд и фаз. Первый и второй усилители можно реализовать по схеме рис. 5.7, б, в которой $R_1=R_2$. Тогда

$$\dot{U}_{\text{вых}}/\dot{U}_{\text{вх}} = 1e^{j \arctg \frac{2\omega CR}{(\omega CR)^2 - 1}}. \quad (5.11)$$

На рабочей частоте $\omega_0=1/(CR)$ фазовый сдвиг равен 90° . Инвертирующий каскад также имеет единичное усиление и цепь

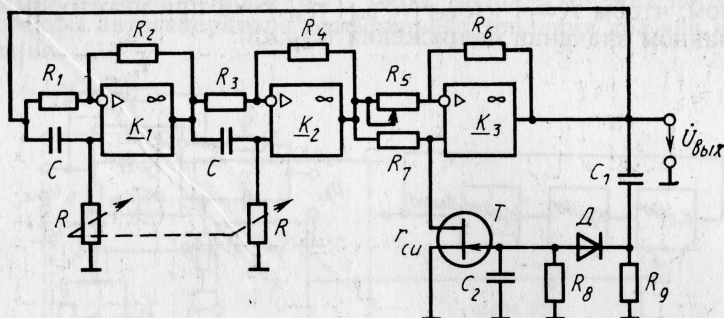


Рис. 5.8. Принципиальная схема трехкаскадного автогенератора

ООС для стабилизации выходного напряжения, как в схеме рис. 5.6. Полная принципиальная схема автогенератора представлена на рис. 5.8. Здесь $R_1=R_2=R_3=R_4$. Резистором R_5 можно в некоторых пределах регулировать амплитуду выходного напряжения. Коэффициент усиления инвертирующего каскада

$$K_3 = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{r_{\text{си}}(R_5 + R_6)}{R_5(R_7 + r_{\text{си}})} - \frac{R_6}{R_5}, \quad (5.12)$$

где $r_{\text{си}}$ — сопротивление канала транзистора T , регулируется цепью ООС таким образом, что $K_1 K_2 K_3 = 1$.

Частота выходного напряжения определяется формулой (5.9) и регулируется двоянным потенциометром R .

Описание лабораторной панели

Схема испытательной панели лабораторного стенда приведена на рис. 5.9. На биполярном транзисторе T смонтирована цепь, которая может быть использована как резонансный усилитель с контуром $L_K C_1 C_2$, либо как LC -автогенератор по емкостной трехточечной схеме. Напряжение обратной связи снимается с конденсатора C_2 . Регулировка напряжения питания транзистора производится с помощью потенциометра $R_{\text{п}}$ («Регулировка $U_{\text{и.п.}}$ »).

Исследование RC -автогенератора с мостом Вина производится на базе ОУ DA_1 и собранных рядом элементов положительной (конденсаторы C и резисторы R по схеме моста Вина) и отри-

цательной (выпрямитель и полевой транзистор T_1) обратных связей. Напряжение питания ОУ $ДА_1$ (а также ОУ $ДА_2—ДА_4$) можно изменять ручкой «Регулировка $U_{и.п.}$ ».

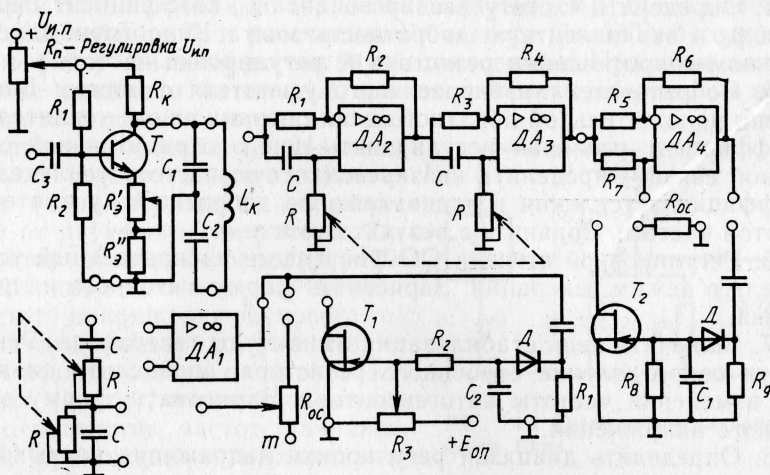


Рис. 5.9. Схема испытательной панели лабораторного стенда

На базе трехкаскадного усилителя (ОУ $ДА_2—ДА_4$) можно собрать автогенератор с фазосдвигающими RC -цепями, включенными в первый и второй каскады, и цепью регулировки коэффициента усиления в третьем каскаде.

Задание

А. Выполняется при подготовке к работе.

1. Начертить схемы автогенераторов: LC -типа по схеме емкостной трехточки и RC -типа с мостом Вина.

2. Рассчитать резонансную частоту и сопротивление на этой частоте контура $L_K C_1 C_2$ усилителя (см. рис. 5.2) при $L_K = 3,2$ мГн, $C_1 = 3,2$ нФ, $C_2 = 3,2$ нФ, $R_K = 82$ Ом.

3. Рассчитать пределы изменения частоты колебаний автогенераторов по схемам рис. 5.6 и 5.8 при $C = 1000$ пФ, $R = (10^4 \div \div 2 \cdot 10^6)$ Ом.

Б. Выполняется в лаборатории.

1. Собрать схему резонансного усилителя с контуром $L_K C_1 C_2$. Определить добротность и резонансную частоту f_0 контура, а также коэффициент усиления на этой частоте.

2. Замкнув цепь обратной связи, преобразовать усилитель в LC -автогенератор по емкостной трехточечной схеме. Определить напряжение U_r и частоту f_r генерируемых колебаний. Зарисовать

форму выходного напряжения, а также напряжения в цепи базы. Сравнить величины f_T и f_0 .

3. Изменяя напряжение источника питания, определить изменение U_T и f_T .

4. Определить частоту квазирезонанса f_0 , коэффициент передачи β_0 и эквивалентную добротность моста Вина (при максимальном сопротивлении резистора R регулировки частоты).

5. Собрать схему избирательного усилителя с мостом Вина в цепи положительной обратной связи операционного усилителя. Коэффициент усиления регулировать цепью отрицательной обратной связи. Определить квазирезонансную частоту усилителя, коэффициент усиления и эквивалентную добротность усилителя на этой частоте. Сравнить с результатами п. 4.

6. Регулировкой степени ООС перевести избирательный усилитель в режим генерации. Зарисовать форму выходного напряжения.

7. Включить цепь стабилизации амплитуды генератора. Регулируя сопротивление сдвоенного резистора, определить диапазон изменения частоты автогенератора. Зарисовать форму выходного напряжения.

8. Определить диапазон регулировки напряжения на выходе автогенератора (с помощью резистора в цепи затвора полевого транзистора T_1).

9. Выяснить зависимость напряжения и частоты колебаний автогенератора от напряжения источника питания.

10*. Включить трехкаскадный RC-генератор с двумя фазосдвигающими цепями и выполнить п. 6, 7, 9 (этот пункт задания выполняется факультативно).

Методические указания по выполнению лабораторной работы

1. Резонансный усилитель с частичным включением контура $L_K C_1 C_2$ собран на биполярном транзисторе. Исследования следует производить при максимальном значении $U_{и.п.}$. Ко входу усилителя напряжение подают от звукового генератора. К выходу усилителя присоединяют осциллограф и вольтметр. Напряжение $\dot{U}_{вых}$ составляет лишь часть напряжения на контуре \dot{U}_K ($\dot{U}_K = \dot{U}_{C_1} + \dot{U}_{C_2} = \dot{U}_{вых} + \dot{U}_{C_2}$).

Поддерживая неизменным входное напряжение усилителя ($\dot{U}_{вх} = 20 \div 50$ мВ), изменяя с помощью звукового генератора частоту входного напряжения в пределах 2—40 кГц и определяют максимальное значение выходного напряжения $U_{вых0}$. После этого можно рассчитать коэффициент усиления $K_0 = U_{вых0}/U_{вх}$. Чтобы точнее определить резонансную частоту f_0 , нужно зафиксировать две частоты f_1 и f_2 , на которых входное напряжение имеет значение $0,71 U_{вых0}$ ($f_1 > f_0 > f_2$); при этом $f_0 = (f_1 + f_2)/2$. Добротность контура $Q = f_0/(f_1 - f_2)$.

2. Чтобы преобразовать резонансный усилитель в автогенератор, достаточно подать напряжение с зажимов конденсатора C_2 на вход усилителя. Частоту колебаний автогенератора можно измерять тремя способами: а) с помощью калиброванной развертки осциллографа по горизонтали (время/см) определяют период колебания T_r и рассчитывают частоту $f_r = 1/T_r$; б) с помощью фигур Лиссажу по экрану осциллографа. При этом напряжение с выхода автогенератора подают, как обычно, на вход усилителя канала вертикального отклонения (канал Y). На вход канала горизонтального отклонения (канал X) подают напряжение от звукового генератора. Генератор развертки осциллографа необходимо отключить. Изменяя частоту напряжения звукового генератора, фиксируют ее значение при возникновении на экране эллипса (круга), что свидетельствует о равенстве частот напряжений, приложенных к пластинам вертикального и горизонтального отклонений электронного луча осциллографа; в) с помощью электронного частотомера любого типа, подключаемого к выходу генератора. Первые два способа имеют ограниченную точность (особенно первый), но позволяют контролировать форму выходного напряжения. Измерения частотомером наиболее точны.

Измерение частоты колебаний автогенератора при изменении E_K следует производить вторым и третьим способами, как более точными.

Чтобы зарисовать с экрана осциллографа форму напряжения в цепи базы и на выходе автогенератора, требуется (если осциллограф использовался для измерения частоты с помощью фигур Лиссажу) включить генератор развертки осциллографа и получить на экране устойчивое изображение.

3. Для исследования моста Вина нужно собрать схему рис. 5.10 ($C = 1000$ пФ, $R = 2 \cdot 10^5$ Ом). Напряжение звукового генератора, подаваемое на вход моста Вина, установить равным $U_{вх} = 3 \div 5$ В и, поддерживая это значение постоянным, определить частоту квазирезонанса моста f_0 и коэффициент передачи $\beta_0 = U_{вых0}/U_{вх}$, где $U_{вых0}$ — напряжение на выходе моста при частоте f_0 ; $U_{вх}$ — напряжение на входе моста.

4. Для включения моста Вина в цепь положительной обратной связи усилителя вход моста Вина необходимо соединить с выходом усилителя, а выход моста Вина — с неинвертирующим входом усилителя (см. рис. 5.6). Движок потенциометра R_{oc} присоединяют к инвертирующему входу ОУ (цепь ООС), а звуковой генератор — к точке m этого потенциометра (см. рис. 5.9).

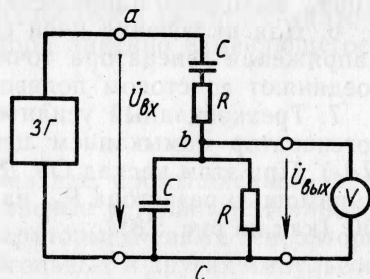


Рис. 5.10. Схема для исследования моста Вина

Вольтметр и осциллограф присоединяют к выходу ОУ. Измерение частоты производят так, как было описано ранее. Регулировкой положения движка потенциометра R_{oc} добиваются, чтобы напряжение $U_{вых}=0$ (отсутствие генерации).

5. Чтобы перевести избирательный усилитель в режиме генерации, точку m (см. рис. 5.9) соединяют с общей точкой схемы (\perp) и регулируют R_{oc} так, чтобы $U_{вых} \neq 0$ (что означает преобладание в усилителе положительной ОС). Обратить внимание на форму выходного напряжения.

6. Для включения цепи стабилизации амплитуды выходного напряжения генератора точку m потенциометра (см. рис. 5.9) соединяют со стоком полевого транзистора согласно рис. 5.6.

7. Трехкаскадный усилитель можно трансформировать в автогенератор замыканием цепи ОС (выход ОУ DA_4 и вход ОУ DA_2). При этом каскад ОУ DA_4 можно охватить нерегулируемой (с помощью резистора R_{oc} на рис. 5.9) либо регулируемой цепью ОС (как на рис. 5.8).

Контрольные вопросы

1. Каково назначение резонансного усилителя в LC -автогенераторе?
2. Какова роль цепи обратной связи в автогенераторе?
3. Каковы условия возникновения колебаний в автогенераторе?
4. Каковы условия существования незатухающих колебаний?
5. Что такое баланс амплитуд и баланс фаз?
6. Какова роль источника питания в автогенераторе?
7. В каких случаях используют RC -автогенераторы?
8. В каких случаях используют LC -автогенераторы?
9. Для чего служат резисторы R_1 , R_2 , R_3 в генераторе, схема которого изображена на рис. 5.2?
10. Что произойдет, если в генераторе параллельно резистору R_3 включить конденсатор?
11. Как изменится частота колебаний LC -автогенератора (см. рис. 5.2), если емкости конденсаторов C_1 и C_2 уменьшить в четыре раза?
12. О чем свидетельствует отличие формы изображения на экране осциллографа от эллипса (круга) при измерении частоты автогенератора с помощью фигур Лиссажу?
13. Какое значение имеет коэффициент усиления усилителя в LC -автогенераторе?
14. Почему изменяются амплитуда и частота генерируемых колебаний при изменении напряжения питания автогенератора?
15. Как изменится частота колебаний RC -автогенератора, если емкость конденсаторов C (см. рис. 5.6 и 5.8) уменьшить в четыре раза?
16. Почему отличаются значения добротностей моста Вина и избирательного усилителя на его основе (см. п. 4 и 5 задания)?
17. Для чего необходима цепь ООС в RC -автогенераторе (см. рис. 5.6)?
18. Может ли напряжение RC -автогенератора (см. рис. 5.6, 5.8) превышать напряжение источника питания?

19. Как влияет подключение измерительных приборов на режим работы (значения $U_{\text{вых}}$ и f_r) LC- и RC-автогенераторов?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

Исследование импульсных устройств

Цель работы. Изучение принципа работы и исследование характеристик компаратора, мультивибратора (в автогенераторном и ждущем режимах) и генератора линейно изменяющегося напряжения (ГЛИН).

Краткие теоретические сведения

В вычислительной технике, автоматике, промышленной электронике широко применяются импульсные устройства. Наибольшее распространение находят компараторы, а также генераторы прямоугольных, пилообразных, треугольных и других импульсов, относящиеся к классу релаксационных генераторов, в которых используются процессы зарядки и разрядки конденсатора.

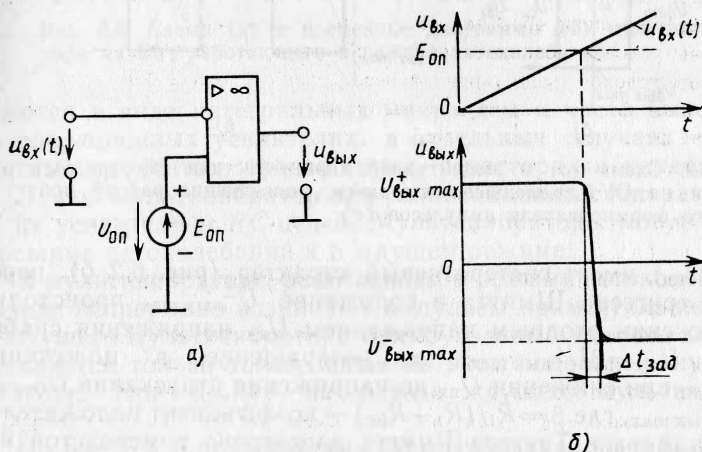


Рис. 6.1. Схема (а) и временные диаграммы (б) компаратора на ОУ

Компараторы. Компаратор — устройство, предназначенное для сравнения измеряемого входного напряжения ($u_{\text{вх}}$) с опорным напряжением ($U_{\text{оп}} = E_{\text{оп}}$), которое должно быть строго постоянным (рис. 6.1, а). При равенстве входного и опорного напряжений происходит скачкообразное изменение полярности выходного напряжения ОУ, например с $U_{\text{вых max}}^+$ на $U_{\text{вых max}}^-$ (рис. 6.1, б). Переключение происходит с некоторой задержкой $\Delta t_{\text{зад}}$. Это одновходовый компаратор общего назначения. Он име-

ет ограниченное входное сопротивление и позволяет сравнивать большие по амплитуде входные сигналы, но не превышающие допустимых значений $U_{вх\max}$.

Триггер Шмитта. Если в компаратор вводится положительная обратная связь, то такое импульсное устройство называют триггером Шмитта (рис. 6.2, а). Благодаря тому что характеристика

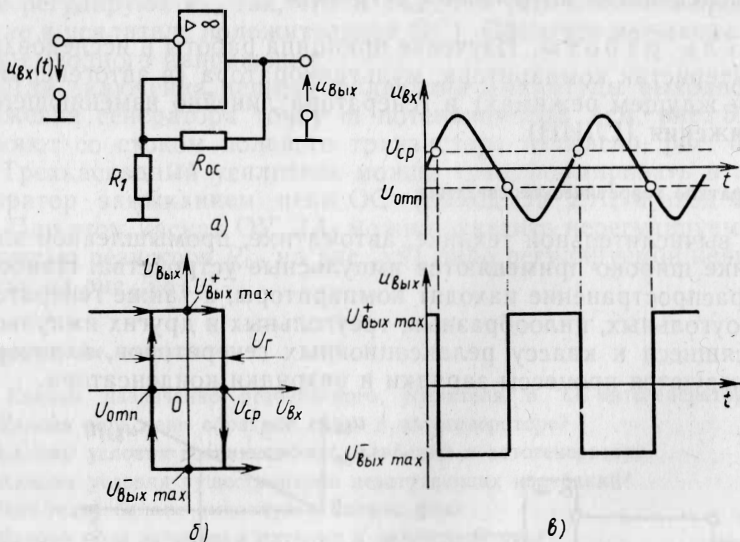


Рис. 6.2. Схема (а) и амплитудная характеристика (б) триггера Шмитта на ОУ; временные диаграммы, поясняющие работу простейшего формирователя импульсов (в)

$U_{вых} = f(U_{вх})$ имеет гистерезисный характер (рис. 6.2, б), переключение триггера Шмитта в положение $U_{-вых\max}$ происходит при достижении входным напряжением $U_{вх}$ напряжения срабатывания $U_{ср} = \beta U_{+вых\max}$, а возвращение в положение $U_{+вых\max}$ — при снижении $U_{вх}$ до напряжения отпускания $U_{отп} = -\beta U_{-вых\max}$, где $\beta = R_1 / (R_1 + R_{ос})$ — коэффициент положительной обратной связи. Триггер Шмитта достаточно помехоустойчив. Его помехоустойчивость определяется значением напряжения гистерезиса $U_{г} = U_{ср} - U_{отп} = (U_{+вых\max} + U_{-вых\max})\beta$. Положительная обратная связь уменьшает также $\Delta t_{зад}$, т. е. увеличивает скорость изменения полярности выходного напряжения. В рассматриваемом триггере $U_{отп} = 0$. Такой триггер является основным устройством для создания импульсных генераторов на ОУ. С его помощью можно получить простейший формирователь прямоугольных импульсов из синусоидального напряжения (рис. 6.2, в). Подавая на вход синусоидальное напряжение $u_{вх}$, амплитуда которого не превышает $U_{вх\max}$, можно получить выходное напряжение прямоугольной формы, скачкообразно изме-

няющееся от $U_{\text{вых max}}^+$ до $U_{\text{вых max}}^-$ и наоборот. С помощью триггера Шмитта благодаря регенеративным процессам можно получить импульсы прямоугольной формы, имеющие крутые фронты и срезы. Промышленность выпускает специализированные интегральные микросхемы, например компараторы 521СА1, 521СА2 и 521СА5, у которых $\Delta t_{\text{зад}}$ составляет несколько десятков наносекунд.

Мультивибраторы. Для получения прямоугольных импульсов широко применяют мультивибраторы. Мультивибраторы выпу-

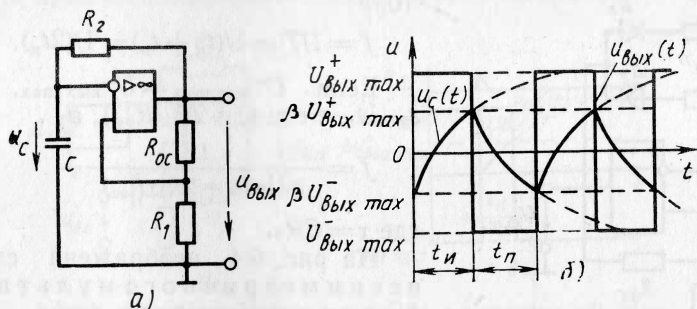


Рис. 6.3. Схема (а) и временные диаграммы (б) мультивибратора на ОУ, работающего в режиме автоколебаний

скаются в виде интегральных микросхем и часто выполняются на операционных усилителях, в отдельных случаях — на дискретных элементах: транзисторах, резисторах и конденсаторах.

Любой мультивибратор как релаксационный генератор состоит из усилителя и RC -цепей. Мультивибраторы могут работать в режиме автоколебаний и в ждущем режиме.

В мультивибраторе, работающем в режиме автоколебаний, на выходе непрерывно возникают импульсы прямоугольной формы. У ждущего мультивибратора прямоугольный импульс на выходе появляется только тогда, когда на вход подается запускающий импульс. При $u_{\text{вх}}=0$ на выходе ждущего мультивибратора $u_{\text{вых}}=0$.

На рис. 6.3, а представлена схема мультивибратора на операционном усилителе, работающего в режиме автоколебаний, т. е. мультивибратор генерирует импульсы прямоугольной формы.

Рассматриваемый мультивибратор является симметричным, т. е. длительности импульса $t_{\text{и}}$ и паузы $t_{\text{п}}$ равны (рис. 6.3, б). Основной частью его является триггер Шмитта, имеющий передаточную характеристику, изображенную на рис. 6.2, б. Из рис. 6.2, б следует, что на выходе мультивибратора напряжение может быть равно $U_{\text{вых max}}^+$ либо $U_{\text{вых max}}^-$. Пусть выходное напряжение мультивибратора равно $U_{\text{вых max}}^+$. Оно подается, с одной стороны, на R_2C -цепь, а с другой — на $R_{\text{ос}}R_1$ -цепь (цепь положительной обратной связи). Как только напряжение на конденса-

торе C достигнет значения $\beta U_{\text{вых max}}^+$, где $\beta = R_1 / (R_1 + R_{oc})$, выходное напряжение мультивибратора скачком перейдет из положения $U_{\text{вых max}}^+$ в положение $U_{\text{вых max}}^-$. С этого момента времени конденсатор C перезаряжается через резистор R_2 , а напряжение на конденсаторе стремится к $U_{\text{вых max}}^-$. Но когда напряжение на нем станет равным $\beta U_{\text{вых max}}^-$, выходное напряжение мультивибратора изменит знак и процессы начнут повторяться вновь.

Частота следования импульсов симметричного мультивибратора

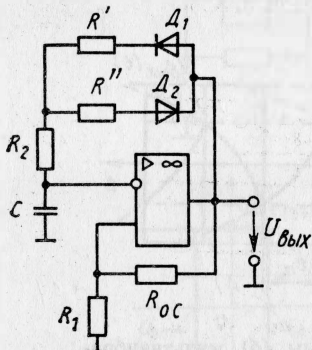


Рис. 6.4. Схема несимметричного мультивибратора

$$f = 1/T = 1/(t_n + t_p) = 1/(2t_n). \quad (6.1)$$

Если $U_{\text{вых max}}^+ = U_{\text{вых max}}^-$, то $t_n = t_p = \tau \ln(1 + 2R_1/R_{oc})$, а

$$f = \frac{1}{2\tau \ln(1 + 2R_1/R_{oc})}, \quad (6.2)$$

где $\tau = CR_2$.

На рис. 6.4 изображена схема несимметричного мультивибратора, у которого $t_n \neq t_p$. Это неравенство обеспечивается разными постоянными времени τ RC -цепей мультивибратора для t_n и t_p .

Из рис. 6.4 видно, что разные постоянные времени получаются за счет включения двух параллельных цепей, состоящих из резисторов и диодов ($R'D_1$ и $R''D_2$). В таком мультивибраторе ток появляется в ветви $R'D_1$, когда выходное напряжение имеет значение $U_{\text{вых max}}^+$, а в ветви $R''D_2$ — когда выходное напряжение равно $U_{\text{вых max}}^-$. С учетом этого можно записать

$$\begin{aligned} t_n &= (R' + R_2)C \ln(1 + 2R_1/R_{oc}); \\ t_p &= (R'' + R_2)C \ln(1 + 2R_1/R_{oc}). \end{aligned} \quad (6.3)$$

Длительность фронтов генерируемых импульсов зависит от типа ОУ и составляет обычно не более 0,5 мкс.

Схема мультивибратора на ОУ, работающего в ждущем режиме (одновибратора), изображена на рис. 6.5, а. С приходом запускающего импульса $u_{\text{вх}}$ (рис. 6.5, б) мультивибратор переходит в неустойчивое состояние, которое имеет некоторую длительность t_n , определяемую времязадающей $R_2'C$ -цепью, после чего устройство возвращается в исходное устойчивое состояние.

Для создания устойчивого состояния (ждущего режима) параллельно конденсатору C включают диод D_3 (рис. 6.5, а) с полярностью, при которой напряжение на диоде и конденсаторе, а следовательно, и на инвертирующем входе ОУ будет равно напряжению $U_{\text{пр}}$ диода. Этому соответствует напряжение на выходе одновибратора $U_{\text{вых max}}^-$. Входное запускающее напряже-

ние, большее $U_{\text{вых max}}^- R_1 / (R_1 + R_{\text{ос}})$, перебрасывает устройство в состояние, когда на выходе появляется напряжение $U_{\text{вых max}}^+$. На неинвертирующий вход ОУ передается напряжение $\beta U_{\text{вых max}}^+$, поддерживающее некоторое время в этом состоянии ждущий мультивибратор. В это время конденсатор C стремится зарядиться до напряжения $U_{\text{вых max}}^+$ через резистор R_2' с постоянной времени $\tau_{\text{зар}} = CR_2'$. Как только напряжение на конденсаторе C сравняется с напряжением $\beta U_{\text{вых max}}^+$, устройство скачком перейдет из неустойчивого в устойчивое состояние и будет ждать прихода следующего запускающего импульса.

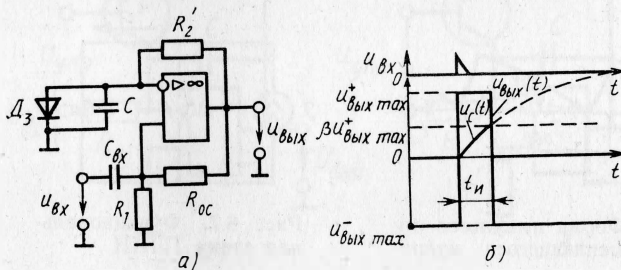


Рис. 6.5. Схема (а) и временные диаграммы (б) ждущего мультивибратора

Длительность выходного импульса ждущего мультивибратора $t_n = \tau_{\text{зар}} \ln(1 + R_1/R_{\text{ос}})$. (6.4)

Отметим, что процесс перехода мультивибратора из неустойчивого состояния в исходное устойчивое (процесс восстановления), определяемый скоростью зарядки конденсатора C , должен быть завершен к приходу следующего запускающего импульса.

Помимо рассмотренных мультивибраторов промышленность выпускает специализированные мультивибраторы в интегральном исполнении.

Генератор линейно изменяющегося напряжения. Генератор линейно изменяющегося напряжения (ГЛИН) — устройство, вырабатывающее импульсное напряжение пилообразной формы (рис. 6.6). Это напряжение характеризуется рядом основных параметров: периодом T , длительностью рабочего T_p и обратного $T_{\text{обр}}$ хода, максимальным напряжением U_{max} , коэффициентом нелинейности

$$\varepsilon = \frac{|du/dt|_{t=0} - |du/dt|_{t=T}}{|du/dt|_{t=0}},$$

где $|du/dt|_{t=0}$ и $|du/dt|_{t=T}$ — соответственно скорости изменения напряжения в начале и в конце рабочего хода, коэффициентом использования ЭДС источника питания $K_E = U_{\text{max}}/E_{\text{и.п.}}$.

Линейно изменяющееся напряжение применяется для перемещения электронного луча по горизонтали в электронно-луче-

вых трубках осциллографов, устройствах задержки импульсов на калиброванное время и в ряде других устройств.

Любой ГЛИН содержит цепь зарядки и разрядки конденсатора, на котором формируется линейно изменяющееся напряжение. На рис. 6.7 изображена функциональная схема ГЛИН. Как известно, напряжение на конденсаторе u_C связано с током i_C соотношением

$$u_C = \frac{1}{C} \int i_C dt. \quad (6.5)$$

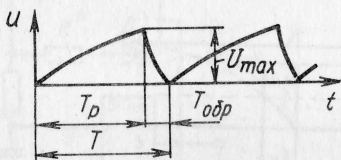


Рис. 6.6. Форма импульсов линейно изменяющегося напряжения

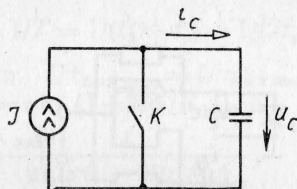


Рис. 6.7. Функциональная схема ГЛИН

При линейном изменении напряжения u_C должно соблюдаться равенство

$$\frac{du_C}{dt} = \text{const.} \quad (6.6)$$

Учитывая (6.5) и (6.6), получим

$$\frac{du_C}{dt} = \frac{i_C}{C} = \text{const.} \quad (6.7)$$

Выражение (6.7) свидетельствует о том, что для обеспечения линейности изменения напряжения необходимо, чтобы зарядный ток был постоянным. В исходном состоянии ключ K разомкнут (рис. 6.7) и конденсатор C заряжается от источника тока J постоянным зарядным током i_C . При замыкании ключа K конденсатор C быстро разряжается. При размыкании и замыкании ключа K процессы повторяются.

На рис. 6.8, а приведена электрическая схема ГЛИН на операционном усилителе, соответствующая рассмотренной функциональной схеме. В этом устройстве операционный усилитель с RC -цепью в звене отрицательной обратной связи представляет собой интегратор. На транзисторе T типа $n-p-n$ собран ключ. Управление транзисторным ключом осуществляется управляющими импульсами $u_{уп}$: при подаче напряжения $u_{уп}$ положительной полярности транзисторный ключ открыт, а при прекращении — закрыт.

При постоянном входном напряжении $U_{вх}$ выходное напряжение ГЛИН определяется выражением

$$u_{вых} = u_C = -\frac{1}{C} \int_0^t i_C dt = -\frac{U_{вх}}{RC} t, \quad (6.8)$$

где $i_C = U_{вх}/R$.

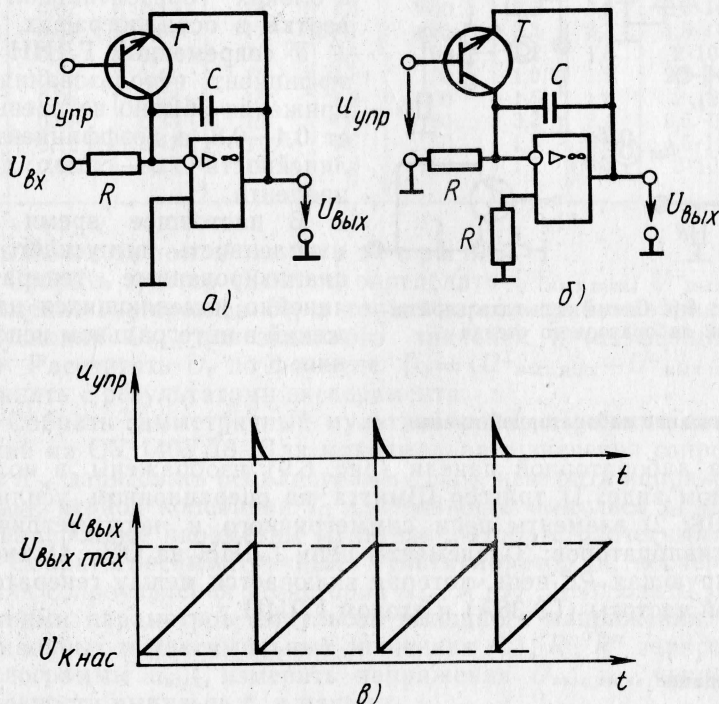


Рис. 6.8. Схема (а) без источника напряжения $U_{вх}$ (б) и временные диаграммы (в) ГЛИН на ОУ

Часто применяют схему ГЛИН, где напряжение $U_{вх}$ отсутствует (рис. 6.8, б). Тогда на инвертирующем входе ОУ будет действовать напряжение смещения $U_{см}$, являющееся параметром ОУ, и формула (6.8) перепишется в виде

$$u_{вых} = -\frac{U_{см}}{RC} t. \quad (6.8a)$$

Из выражения (6.8) следует, что выходное напряжение линейно изменяется во времени. Из временных диаграмм (рис. 6.8, в), иллюстрирующих работу данного ГЛИН, следует, что в период пауз управляющих импульсов $u_{упр}$ выходное напряжение линейно возрастает. Максимальное значение U_{max} , до которого

оно может возрастать, составляет $U_{\text{вых max}}$. При появлении управляющего импульса $u_{\text{упр}}$ конденсатор C быстро разряжается через малое сопротивление промежутка коллектор — эмиттер, а выходное напряжение снижается до уровня $U_{\text{к.нас}}$, далее процессы повторяются.

ГЛИН широко применяется в блоках горизонтальной развертки в осциллографах.

У современных ГЛИН коэффициент использования напряжения обычно не превышает 0,4—0,8, а коэффициент нелинейности ε — сотых долей процента.

В настоящее время промышленность выпускает специализированные генераторы линейно изменяющихся напряжений в интегральном исполнении.

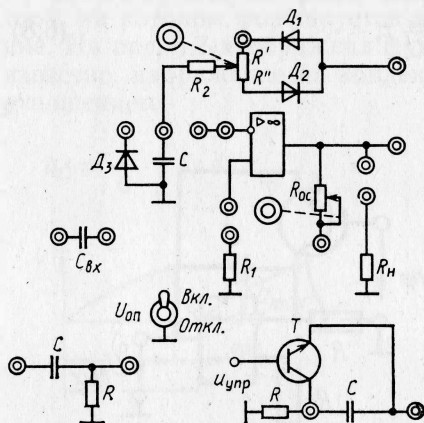


Рис. 6.9. Схема испытательной панели лабораторного стенда

Описание лабораторной панели

На лабораторной панели (рис. 6.9) изображены в полусобранном виде: 1) триггер Шмитта на операционном усилителе 140УД8; 2) элементы цепи симметричного и несимметричного мультивибраторов; 3) элементы цепи ГЛИН на ОУ; 4) дифференцирующая RC -цепь, которая включается между генератором низкой частоты (ГЗ-36А) и входом ГЛИН.

Задание

А. Выполняется при подготовке к работе.

1. Начертить схему триггера Шмитта на операционном усилителе.

2. Начертить схемы мультивибратора и ГЛИН на операционном усилителе.

3. Рассчитать длительности импульса и паузы, амплитуду выходных сигналов симметричного мультивибратора, собранного на ОУ типа 140УД8 при $E_{\text{и.п}} = 15$ В; значения емкостей конденсаторов и сопротивлений резисторов в соответствии с номером бригады приведены в табл. 6.1.

4. Рассчитать максимальное значение выходных импульсов ГЛИН при $U_{\text{см}} = 20$ мВ. Значения емкостей конденсаторов C , сопротивлений резисторов R и времени t приведены в табл. 6.1 в соответствии с номером бригады.

Таблица 6.1

Номер бри- гады	Триггер Шмитта β	Мультивибратор на ОУ				ГЛИН		
		C , мкФ	R_1 , кОм	R_2 , кОм	$R_{ос'}$, кОм	C , нФ	R , кОм	t , с
1	0,10	0,68	12	1,6	120	1,0	2,0	10^{-4}
2	0,15	0,33	15	1,2	130	1,5	2,2	$2 \cdot 10^{-4}$
3	0,07	0,47	18	1,5	200	2,5	3,0	$0,5 \cdot 10^{-4}$
4	0,04	0,68	11	1,1	180	3,3	3,3	$1,5 \cdot 10^{-4}$
5	0,2	0,33	10	2,0	91	1,2	1,8	$2 \cdot 10^{-4}$
6	0,05	0,47	18	1,8	120	1,0	1,5	$2,5 \cdot 10^{-4}$
7	0,03	0,68	15	1,2	200	1,5	1,6	$2 \cdot 10^{-4}$
8	0,08	0,33	12	1,5	180	3,3	2,4	$0,5 \cdot 10^{-4}$
9	0,12	0,47	11	1,6	150	1,5	3,0	$1,5 \cdot 10^{-4}$
10	0,06	0,68	12	1,2	100	1,2	3,3	$3 \cdot 10^{-4}$

Б. Выполняется в лаборатории.

1. Собрать триггер Шмитта, определить $U^{+}_{\text{вых max}}$, $U^{-}_{\text{вых max}}$, напряжение гистерезиса $U_{\text{г}}$, а также пороги срабатывания $U_{\text{ср}}$ и отпускания $U_{\text{отп}}$ для заданного значения β (коэффициента ПОС). Рассчитать $U_{\text{г}}$ по формуле $U_{\text{г}} = (U^{+}_{\text{вых max}} + U^{-}_{\text{вых max}})\beta$ и сравнить с результатами эксперимента.

2. Собрать симметричный мультивибратор в режиме автоколебаний на ОУ 140УД8. Для максимального значения сопротивления $R_{ос}$ зарисовать осциллограмму $u_{\text{вых}}$, измерить напряжение $U_{\text{вых max}}$, период колебаний T , длительность импульса $t_{\text{и}}$. Сравнить измеренные параметры мультивибратора с расчетными.

3. Собрать несимметричный мультивибратор и, поочередно изменяя сопротивления резисторов $R_{ос}$, R' , R'' , наблюдать за изменениями параметров импульсов выходного напряжения. При минимальных и максимальных значениях $R_{ос}$, R' , R'' зарисовать осциллограммы $u_{\text{вых}}$, измерить напряжения $U_{\text{вых max}}$, период T , длительности импульса $t_{\text{и}}$ и паузы $t_{\text{п}}$.

4. Для мультивибратора в ждущем режиме на ОУ 140УД8 (см. рис. 6.5, а) определить напряжение $U_{\text{вх}}$, при котором начинает работать мультивибратор, а также измерить напряжение $U_{\text{вых max}}$ и длительность импульса $t_{\text{и}}$.

5. Собрать ГЛИН на ОУ 140УД8 (см. рис. 6.8), снять осциллограммы выходных импульсов; измерить длительность периода T , длительности рабочего $T_{\text{р}}$ и обратного $T_{\text{обр}}$ хода, $U_{\text{вых max}}$ выходных импульсов, рассчитать коэффициент использования ЭДС источника питания $K_{\text{Е}}$.

Методические указания по выполнению лабораторной работы

1. Измерение напряжения $U_{\text{вых max}}$, длительности и других параметров импульсов производят с помощью осциллографа.

2. Напряжения $U_{\text{вых max}}^+$, $U_{\text{вых max}}^-$, $U_{\text{ср}}$, $U_{\text{отп}}$, U_{Γ} , триггера Шмитта определяют по осциллограммам, как показано на рис. 6.2, в. При этом $U_{\Gamma} = U_{\text{ср}} + U_{\text{отп}}$. Входное напряжение должно быть в пределах 0,3—0,5 В.

3. Приводя в отчете осциллограммы по осям абсцисс и ординат, необходимо указать масштабы (по оси абсцисс — мкс/см, по оси ординат — В/см). Усиление сигнала осциллографом следует выбирать таким, чтобы изображение занимало по вертикали около $\frac{2}{3}$ экрана.

4. Расчет коэффициента использования ЭДС источника питания ГЛИН осуществляют по формуле $K_E = U_{\text{вых max}}/E_{\text{и.п.}}$, где $U_{\text{вых max}}$ измеряют с помощью осциллографа.

Для уменьшения времени, при котором ключ (транзистор T) открыт, прямоугольные импульсы с генератора низкой частоты (ГЗ-36А) предварительно должны поступать на дифференцирующую RC -цепь.

С выхода этой цепи снимаются управляющие импульсы $u_{\text{упр}}$, форма которых представлена на рис. 6.8, в.

Контрольные вопросы

1. Что такое компаратор и для чего он применяется?
2. Что такое триггер Шмитта?
3. Что называют напряжением гистерезиса?
4. Какая обратная связь и почему применяется в триггере Шмитта?
5. Чем определяются длительности импульса и паузы в мультивибраторе на ОУ?
6. Для чего необходимы диоды в мультивибраторе на ОУ?
7. Из каких соображений определяют коэффициент положительной обратной связи β в мультивибраторе?
8. От чего зависят в мультивибраторе на ОУ минимальная и максимальная частоты повторения импульсов?
9. Что такое коэффициент использования ЭДС источника питания и коэффициент нелинейности ГЛИН?
10. Чем определяется максимальное значение выходного напряжения ГЛИН на ОУ?
11. Каково назначение транзистора в ГЛИН на ОУ?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

Исследование логических элементов и устройств

Цель работы. Ознакомление с основными характеристиками простейших логических микросхем, основами синтеза сложных логических элементов и триггеров, логических функций.

Логические элементы. Логические элементы в отличие от аналоговых устройств (усилителей и др.), рассмотренных в предыдущих лабораторных работах, допускают в качестве значений входных и выходных напряжений лишь два уровня: «высокий» и «низкий». Как правило, «высокий» уровень напряжения соответствует логической «1», а «низкий» — логическому «0». В транзисторно-транзисторной логике (ТТЛ) напряжение логического «0» U^0 составляет десятые доли вольт, а напряжение логической «1» $U^1 \geq 2,4$ В. Логические элементы реализуют простейшие функции или систему функций алгебры логики.

Простейшей функцией алгебры логики является функция НЕ, которая реализуется с помощью инвертора. На вход инвертора подается величина A , которая может принимать два значения: «0» и «1». Выходная величина Q тоже принимает два значения: «0» и «1». Взаимно однозначное соответствие A и Q дается таблицей истинности (табл. 7.1); при этом значение выходной величины Q зависит не от предыдущих значений, а лишь от текущего значения входной величины A . Это справедливо для всех логических элементов, не имеющих памяти, у которых в таблице истинности значение Q не зависит от порядка строк.

В алгебре логики вместо таблицы записывается равенство $Q = \bar{A}$. Условное графическое обозначение логического элемента НЕ приведено на рис. 7.1.

Логическими элементами, реализующими функции логического сложения и логического умножения, являются элементы ИЛИ и И. Таблицы истинности для этих элементов однозначно связывают значение выходной величины Q со значениями трех (или более) входных величин $A1, A2, A3, \dots$ (табл. 7.2).

Таблица 7.2

Входы элементов ИЛИ и И			Выходы элементов	
$A1$	$A2$	$A3$	ИЛИ	И
			Q	Q
0	0	0	0	0
1	0	0	1	0
0	1	0	1	0
1	1	0	1	0
0	0	1	1	0
1	0	1	1	0
0	1	1	1	0
1	1	1	1	1

Условные графические обозначения логических элементов ИЛИ и И приведены на рис. 7.2, 7.3.

Объединяя элементы НЕ, И и ИЛИ, можно реализовать более сложные логические функции. На рис. 7.4, а показано условное обозначение логического элемента, состоящего из двух элементов НЕ и одного элемента И (рис. 7.4, б). Таблица истинности для такого элемента легко может быть составлена по таблицам истинности отдельных простейших элементов. Состав-

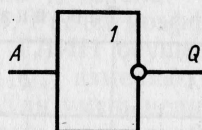


Рис. 7.1. Условное графическое обозначение логического элемента НЕ

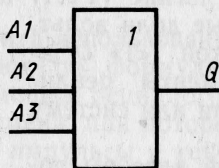


Рис. 7.2. Условное графическое обозначение логического элемента И

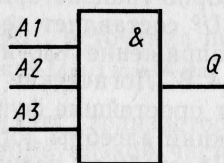


Рис. 7.3. Условное графическое обозначение логического элемента ИЛИ

ление таблицы истинности элемента, изображенного на рис. 7.4, а, показано в табл. 7.3.

Таблица 7.3

Входы			Промежуточные результаты		Выход	Входы			Промежуточные результаты		Выход
A1	A2	A3	$\overline{A3}$	\overline{Q}	Q	A1	A2	A3	$\overline{A3}$	\overline{Q}	Q
0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1
1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1
0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1
1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	0	1

Аналогично проводится анализ (составление таблиц истинности) и более сложных логических схем. Наиболее распро-

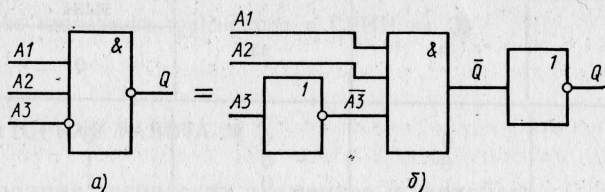


Рис. 7.4. Условное графическое обозначение комбинарного логического элемента ЗИ-НЕ (а) и его логическая схема (б)

раненными являются комбинированные элементы ИЛИ и НЕ, И и НЕ, которые обозначают: ИЛИ—НЕ — элемент Шеффера, И—НЕ — элемент Пирса.

Однако на практике в одной микросхеме встречаются комбинации различных элементов, что позволяет с меньшими затратами реализовать часто встречающиеся логические функции. На рис. 7.5, а приведено условное графическое обозначение микросхемы К155ЛР-4, состоящей из двух элементов И (каждый с

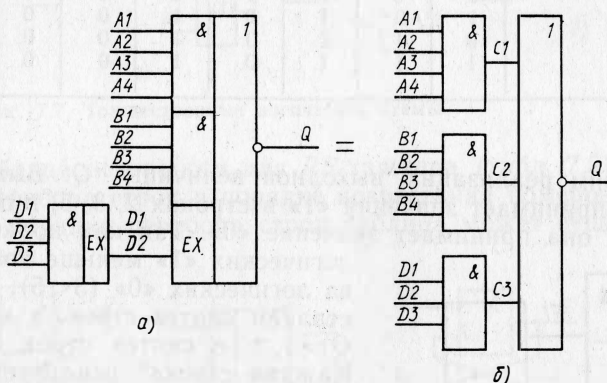


Рис. 7.5. Условное графическое обозначение (а) и эквивалентная схема (б) комбинированного логического элемента 4—4—3И—3ИЛИ—НЕ

четырьмя входами), подключенных выходами к элементу ИЛИ—НЕ, и добавочных двух входов EX, к которым может подключаться только специальная микросхема, так называемый четырехходовый расширитель по ИЛИ (микросхема К155ЛД1). Микросхема в соответствии с принятой мнемоникой обозначается 4—4И—2ИЛИ—НЕ с возможностью расширения по ИЛИ. Обозначение расшифровывается так: два четырехходовых элемента И, подключенных к двухходовому элементу ИЛИ—НЕ, представляют возможность расширения по ИЛИ (входы EX). Эквивалентная схема микросхемы К155ЛР-4 с подключенным расширителем К155ЛД1 приведена на рис. 7.5, б. Для этой схемы мнемоника выглядит следующим образом: 4—4—3И—3ИЛИ—НЕ.

С помощью рассмотренных логических элементов могут быть реализованы сложные логические функции, требующие специальных логических устройств.

Логические элементы И, ИЛИ, НЕ позволяют реализовать синтез логических устройств любой сложности. Проиллюстрируем синтез логического устройства на примере таблицы истинности (табл. 7.4).

Номер строки по порядку	A_1	A_2	A_3	Q	\overline{Q}	F_1	F_2	F_3
1	0	0	0	0	1	0	0	0
2	1	0	0	1	0	1	0	0
3	0	1	0	1	0	0	1	0
4	1	1	0	0	1	0	0	0
5	0	0	1	1	0	0	0	1
6	1	0	1	0	1	0	0	0
7	0	1	1	0	1	0	0	0
8	1	1	1	0	1	0	0	0

Рассмотрим реализацию выходной величины Q . Выходная величина Q принимает значения «1» в строках 2, 3, 5, в остальных строках она принимает значение «0». Так как количество логических «1» меньше количества логических «0» ($3 < 5$), осуществляем синтез строк, в которых $Q=1$, т. е. синтез строк 2, 3, 5. Каждая строка реализуется одним элементом И с соответствующими элементами НЕ на входах (рис. 7.6). Промежуточные величины F_1, F_2, F_3 принимают значения «1» только в строках 2, 3, 5 соответственно. Далее устройство ИЛИ осуществляет преобразование сигналов F_1, F_2, F_3 в выходную величину Q .

Рис. 7.6. Синтез логической схемы

Если в синтезируемой таблице истинности выходная величина чаще принимает значение «1», то синтезируются строки, в которых выходная величина равна «0», например \overline{Q} в табл. 7.4. Синтез проводят точно так же, но на выходе схемы ИЛИ ставят инвертор НЕ (рис. 7.6).

Более сложным логическим устройством является сумматор, позволяющий на выходных шинах получить число, равное сумме чисел, поданных на входные шины первого и второго чисел. При синтезе сложных логических устройств с ограниченным набором элементов часто бывает целесообразно учесть и тождественность ряда логических схем. Некоторые из них показаны на рис. 7.7, а, б, их эквивалентность легко проверяется по таблицам истинности.

На логических элементах могут быть построены устройства с памятью. Простейшим из них является асинхронный RS-триг-

гер, две разновидности которого приведены на рис. 7.8 и 7.9. Триггер на элементах ИЛИ—НЕ (рис. 7.8) имеет прямые входы R, S , триггер на элементах И—НЕ (рис. 7.9) — инверсные входы \bar{R}, \bar{S} и два выхода: прямой Q и инверсный \bar{Q} .

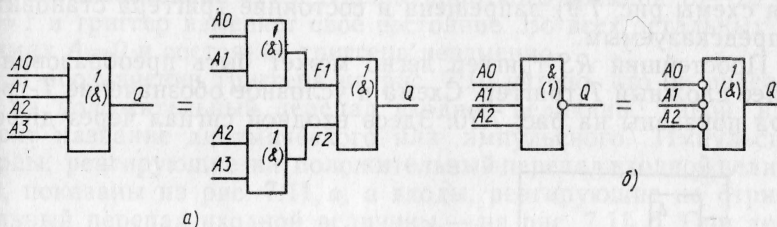


Рис. 7.7. Тожественные логические схемы

Таблица истинности для RS -триггера (табл. 7.5) составлена для перебора строк в порядке возрастания номеров. При изменении порядка перебора строк таблица может существенно измениться.

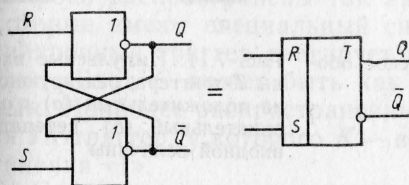


Рис. 7.8. Схема RS -триггера на элементах 2ИЛИ—НЕ

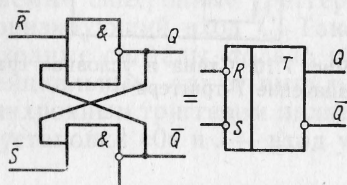


Рис. 7.9. Схема RS -триггера на элементах 2И—НЕ

Как видно из таблицы, при $R=1, S= (\bar{R}=0, \bar{S}=1)$

Таблица 7.5

Номер строки по порядку	R	\bar{R}	S	\bar{S}	Q	\bar{Q}	Режим
1	1	0	0	1	0	1	Установка «0» Хранение информации, записанной в предыдущем такте («0»): установка «1» хранение «1»
2	0	1	0	1	0	1	
3	0	1	1	0	1	0	
4	0	1	0	1	1	0	

триггер устанавливается в состояние «0» ($Q=0, \bar{Q}=1$), при $R=0, S=1$ — в состояние «1». Поэтому вход R называется входом установки нуля, а вход S — входом установки единицы. Отсутствие входных сигналов ($R=0, S=0, \bar{R}=1, \bar{S}=1$) обеспечивает режим хранения информации, когда состояние триггера

остается без изменения и хранится информация, записанная ранее.

Для асинхронного RS -триггера одновременная подача сигналов на два входа ($R=1$, $S=1$ для схемы рис. 7.8 и $\bar{R}=0$, $\bar{S}=0$ для схемы рис. 7.9) запрещена и состояние триггера становится непредсказуемым.

Простейший RS -триггер легко может быть преобразован в более сложный T -триггер. Схема и условное обозначение T -триггера показаны на рис. 7.10. Здесь входной сигнал через диффе-

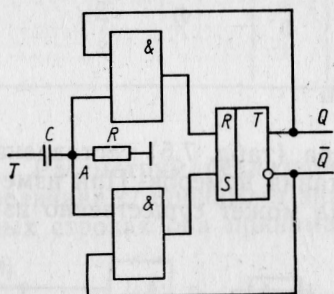


Рис. 7.10. Схема и условное графическое обозначение T -триггера

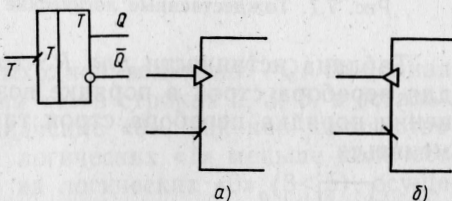


Рис. 7.11. Импульсные входы T -триггера, реагирующие на положительный (а) и отрицательный (б) перепады входной величины

ренцирующую RC -цепь подается на вход двух элементов И, управляющих входными сигналами R и S RS -триггера. В зависимости от текущего состояния RS -триггера сигнал поступает только на один вход: R или S . Подача входных сигналов Q и \bar{Q} осуществлена так, что входной сигнал всякий раз осуществляет переключение RS -триггера.

Для предотвращения повторного переключения триггера при изменении его выходных сигналов Q и \bar{Q} длительность входного сигнала ограничивается дифференцирующей RC -цепью. Логика работы T -триггера пояснена в таблице истинности (табл. 7.6).

Таблица 7.6

Номер строки по порядку	T	A	R	S	Q	\bar{Q}
1	0	0	0	0	0	1
2	$0 \rightarrow 1$	1	0	1	1	0
3	1	0	0	0	1	0
4	$1 \rightarrow 0$	0	0	0	1	0
5	0	0	0	0	1	0
6	$0 \rightarrow 1$	1	1	0	0	1
7	1	0	0	0	0	1

В табл. 7.6 кроме состояний «0» и «1» для входной величины T отмечены переходы из состояния «0» в состояние «1» — $0 \rightarrow 1$ (строки 2 и 6) и из состояния «1» в состояние «0» — $1 \rightarrow 0$ (строка 4). Именно при переходе входной величины T из состояния «0» в состояние «1» в течение короткого времени ($5-20$ нс) $A=1$ и триггер изменяет свое состояние. Во всех остальных режимах $A=0$ и состояние триггера неизменно.

В обозначении триггера на рис. 7.10 учтено, что он реагирует на положительный перепад входной величины. Такой вход носит название динамического или импульсного. Импульсные входы, реагирующие на положительный перепад входной величины, показаны на рис. 7.11, а, а входы, реагирующие на отрицательный перепад входной величины, — на рис. 7.11, б. Они легко могут быть осуществлены с помощью элементов И—НЕ.

На практике в T -триггере обычно присутствуют и входы R , S для его установки в состояния «0» и «1», т. е. получается RST -триггер.

Рассмотренные триггеры являются асинхронными, т. е. входные сигналы могут подаваться в произвольные моменты времени. Широко распространены так называемые синхронные триггеры, которые имеют специальный синхронизирующий вход C . Такой синхронный триггер реагирует на входные сигналы только при $C=1$. Вход C может быть как потенциальным, так и импульсным. Наиболее распространенным синхронным триггером является JK -триггер, у которого K — вход установки «0» и J — вход установки «1».

Объединяя логические устройства без памяти и запоминающие информацию (триггеры), можно получить разнообразные устройства для обработки информации: регистры; счетчики, дешифраторы и др., которые рассматриваются в лабораторной работе № 8.

Описание лабораторной панели

На лабораторной панели, схема которой показана на рис. 7.12, расположены семь логических микросхем серии 155. Параметры микросхем приведены в табл. 7.7. На верхнюю часть панели выведены зажимы вольтметров постоянного напряжения и источники с напряжением $U^0=0$ В и $U^1=2,5$ В. Выводы источников постоянного напряжения U^0 и U^1 расположены и в других местах панели (на рис. 7.12 не показаны).

Монтаж логических устройств в соответствии с заданием ведется гибкими проводами со штекерами.

На панели все общие выводы, отмеченные знаком \perp , соединены с корпусом, поэтому соединения между логическими элементами осуществляются одним проводом. Вторым проводом служит общий заземляющий провод. Напряжение питания $U_{н.п}=5$ В $\pm 5\%$.

Таблица 7.7

Наименование микросхем	Набор элементов микросхем	Потребляемый ток, мА	U^0 , В, не более	U^1 , В, не менее	Время задержки, нС
K155ЛН1	Шесть элементов 1НЕ	35	0,4	2,4	22
K155ЛА4	Три элемента 3И—НЕ	27	0,4	2,4	22
K155ЛИ1	Четыре элемента 2И	33	0,4	2,4	27
K155ЛА3	Четыре элемента 2И—НЕ	27	0,4	2,4	22
K155ЛЕ1	Четыре элемента 2ИЛИ—НЕ	27	0,4	2,4	15

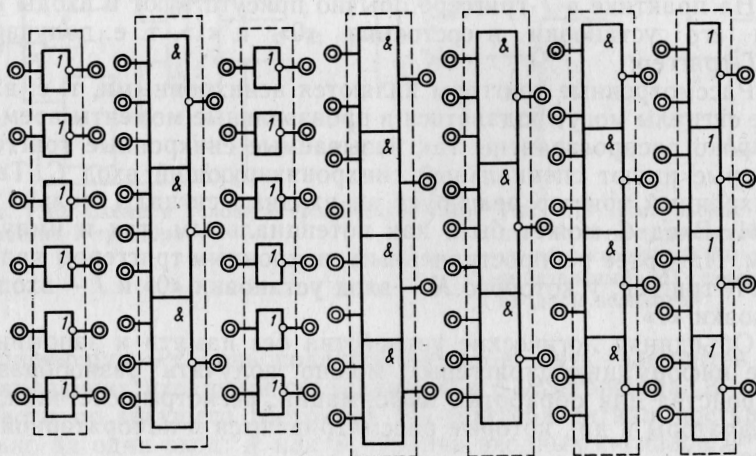


Рис. 7.12. Схема испытательной панели лабораторного стенда

Задание

А. Выполняется при подготовке к работе.

1. Изобразить логические устройства, выполняющие логические функции 2—2И—ИЛИ—НЕ, 2—2ИЛИ—2И—НЕ, 2—3И—2И—НЕ, 2—2—2ИЛИ—3И.

2. Записать таблицы истинности для логических элементов 1—2ИЛИ—2И—НЕ, 2—1И—2ИЛИ—НЕ, 2—2ИЛИ—2И, 2ИЛИ—НЕ.

3. Начертить схему, реализующую логическую функцию в соответствии с табл. 7.8.

Б. Выполняется в лаборатории.

1. Снять переходные характеристики $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$ логических элементов НЕ, ИЛИ—НЕ (или И—НЕ) и определить область допустимых входных напряжений $U^0_{\text{вх}}$, $U^1_{\text{вх}}$.

Номер строки по порядку	A1	A2	A3	Значение логических функций Q для бригад				
				1, 6	2, 7	3, 8	4, 9	5, 10
1	0	0	0	1	0	1	0	1
2	1	0	0	0	1	1	1	0
3	0	1	0	0	0	0	0	1
4	1	1	0	0	0	1	1	0
5	0	0	1	1	1	1	0	1
6	1	0	1	0	1	0	1	0
7	0	1	1	0	0	0	0	1
8	1	1	1	1	0	1	0	1

2. Определить значение $U^1_{\text{вых}}$ устройства ЗИ—НЕ при различных комбинациях входных сигналов.

3. Осуществить синтез логической схемы в соответствии с табл. 7.8 и экспериментально определить ее таблицу истинности.

4. Собрать схему RS -триггера на двух элементах 2ИЛИ—НЕ, проверить его работоспособность.

5. Собрать схему RS -триггера с инверсными входами на двух элементах 2И—НЕ, проверить его работоспособность.

6. С помощью двух инверторов перевести инверсный RS -триггер в T -триггер с прямыми входами.

7*. На основе трех элементов 2И—НЕ собрать схему синхронного RS -триггера с прямыми входами, проверить его работоспособность и заполнить таблицу истинности (выполняется факультативно).

Методические указания по выполнению лабораторной работы

1. Для снятия переходной характеристики логических элементов НЕ, ИЛИ—НЕ, И—НЕ заменяют значение выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ при плавном изменении входного напряжения $U_{\text{вх}}$. Отмечают, при каких входных напряжениях выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ соответствует паспортным данным.

2. При проверке работоспособности логических устройств подают на их входы комбинации входных сигналов от шин «0» и «1» и замеряют значение выходного напряжения вольтметром.

3. Проверку работоспособности триггера проводят посредством кратковременной подачи сигналов «1» и «0» на входы R и S , замеряют значения напряжений на выходах триггера.

Контрольные вопросы

1. Какие логические элементы являются универсальными?
2. Можно ли построить *RS*-триггер на элементах И, ИЛИ, ИЛИ—НЕ?
3. Какие величины нельзя подавать на *RS*-триггер с прямыми входами?
4. Какие величины нельзя подавать на *RS*-триггер с инверсными входами?
5. Покажите условное графическое обозначение логического устройства 3—3—ЗИ—ИЛИ—НЕ.
6. Что такое возможность расширения по ИЛИ?
7. Какие логические устройства можно создать из трех элементов 2И—НЕ?
8. Можно ли соединять между собой два (или более) выхода логических элементов?
9. Как работает *T*-триггер?
10. Что такое импульсный вход?
11. Как работает *RST*-триггер?
12. Что такое синхронный триггер?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8

Исследование регистров, счетчиков и дешифраторов

Цель работы. Ознакомление с устройством и принципом работы простейших регистров, счетчиков и дешифраторов, способами ввода и вывода цифровой информации.

Краткие теоретические сведения

Регистры, счетчики и дешифраторы являются наиболее распространенными функциональными узлами в устройствах вычислительной техники. Их используют для ввода и вывода цифровой информации, выполнения над ней различных операций. Каждый из этих узлов выполняет определенные функции. Узлы связаны между собой линиями связи, по которым передается цифровая информация. Передача информации осуществляется в виде кода, т. е. комбинации электрических сигналов.

В современной вычислительной технике логические и арифметические операции выполняются в основном над числами, представленными в двоичном коде, в котором используются лишь две цифры: 1 и 0. Для представления одного разряда двоичного числа служит триггер, имеющий два устойчивых состояния, одно из которых принимается за единицу, другое — за нуль.

Передача цифровой информации по линии связи может осуществляться в виде параллельного кода по нескольким каналам одновременно либо в виде последовательной комбинации сигналов по одному каналу. В первом случае увеличивается быстродействие, во втором получается более экономичная схемная реализация.

Цифровые устройства строят из типовых узлов и логических элементов, представляющих собой интегральные микросхемы.

Передача цифровой информации из одного устройства в другое может осуществляться синхронно с тактовыми импульсами, когда сигнал воздействует на элемент в строго определенный момент времени, а именно в момент действия тактового импульса. Такие устройства называют синхронными. Если же выходной сигнал одного устройства непосредственно воздействует на следующий элемент, то такие устройства называют асинхронными.

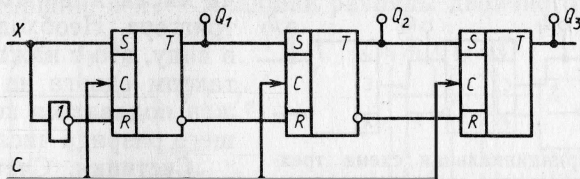


Рис. 8.1. Принципиальная схема трехразрядного регистра сдвига

Регистры. Для запоминания двоичного числа при выполнении арифметических и логических операций над ним служит устройство, называемое регистром. Регистр состоит из связанных между собой триггеров, количество которых равно количеству разрядов в запоминаемом числе. Все триггеры регистра находятся под воздействием общих сигналов управления. С помощью регистров выполняются такие действия над числами, как прием их из одного устройства и передача в другое, сдвиг числа в сторону старших или младших разрядов на требуемое количество разрядов, преобразование последовательного кода в параллельный или наоборот, хранение чисел и др. В регистре памяти число может храниться в течение определенного промежутка времени и неоднократно считываться при подаче соответствующей команды. Сдвиг числа также осуществляется при подаче соответствующей команды, каждый импульс которой продвигает число на один разряд.

Принципиальная схема простейшего трехразрядного регистра сдвига на RS-триггерах приведена на рис. 8.1. На вход S (установка триггера в состояние «1») подается сигнал с неинвертирующего выхода предыдущего триггера, а на вход R (установка триггера в состояние «0») — с инвертирующего выхода. Импульс команды сдвига подается одновременно на счетные входы C всех триггеров регистра и переводит каждый последующий триггер в состояние, в котором находился триггер предыдущего разряда. Инвертор на входе регистра служит для подачи входного сигнала \bar{X} на вход R первого триггера. Таким образом, каждый импульс команды сдвига «продвигает» число на один разряд вправо. Если, например, число вводится в регистр параллельным кодом, то с помощью операции сдвига на выходе регистра можно полу-

чить последовательный код того же числа. Операция сдвига используется в ЭВМ, например, для замены операции умножения одного числа на другое операциями сдвига и сложения.

Если замкнуть выход регистра сдвига на его вход, то получится так называемый кольцевой счетчик, в котором будут циркулировать записанные одна или несколько кодовых единиц. Максимальный коэффициент пересчета такого счетчика равен количеству входящих в него триггеров. Загрузка регистра сдвига числом в последовательном коде осуществляется путем пода-

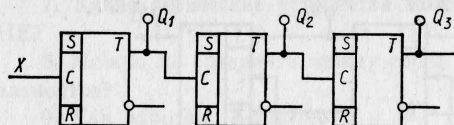


Рис. 8.2. Принципиальная схема трехразрядного двоичного счетчика

чи числа X на вход первого триггера. Необходимо иметь в виду, что с каждым новым тактом сдвига на вход должен подаваться код следующего разряда числа X .

Счетчики. Счетчиком импульсов называют функциональный узел, предназначенный

для подсчета по некоторому основанию числа поступивших на вход импульсов. На рис. 8.2 изображена принципиальная схема простейшего трехразрядного асинхронного двоичного счетчика на основе RS-триггеров со счетным входом C . Каждый поступивший на вход импульс перебрасывает первый триггер в противоположное состояние. Выходной сигнал первого триггера служит входным сигналом для второго и т. д. Таким образом, кодовая комбинация по основанию «2» сигналов на выходах Q_1 , Q_2 , Q_3 будет соответствовать количеству поступивших на вход счетчика импульсов.

При необходимости вести счет по другому основанию используют обратные связи. В этом случае при подаче на вход последнего импульса в выбранном основании все триггеры переводятся в состояние «0» и счет начинается сначала. Если на счетный вход каждого последующего триггера счетчика подать сигнал с инвертирующего выхода предыдущего триггера, то счетчик будет осуществлять операцию вычитания, т. е. будет вычитающим. Счетчики, способные выполнять функции сложения и вычитания, называются реверсивными.

Дешифраторы. Дешифратором называют цифровое логическое устройство, имеющее в общем случае n входов и 2^n выходов, где каждому значению двоичного кода на входе соответствует сигнал на одном вполне определенном выходе. На остальных выходах сигналы отсутствуют.

Дешифраторы используют, как правило, для преобразования двоичного кода числа в сигнал управления на соответствующей шине теми или иными устройствами (арифметическими, логическими и т. д.). Функционирование дешифратора, например на три входа и восемь выходов, описывается следующей системой логических уравнений:

$$Y_0 = \bar{X}_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3;$$

$$Y_1 = \bar{X}_1 \bar{X}_2 X_3;$$

$$Y_2 = \bar{X}_1 X_2 \bar{X}_3;$$

$$\dots\dots\dots$$

$$Y_7 = X_1 X_2 X_3$$

где X_1 — старший, а X_3 — младший разряды двоичного числа.

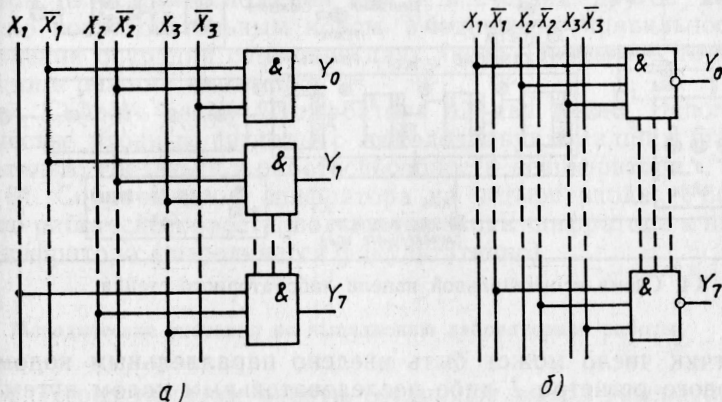


Рис. 8.3. Принципиальные схемы дешифраторов на три входа

Такой дешифратор может быть построен с помощью восьми трехвходовых логических элементов И (рис. 8.3, а), либо восьми трехвходовых элементов И—НЕ (рис. 8.3, б).

Используя логические элементы, можно реализовать и обратную функцию, когда при подаче сигнала на определенный вход устройства можно получить на его выходе соответствующую кодовую комбинацию двоичного числа. Такие устройства называют шифраторами.

Описание лабораторной панели

В лабораторной работе использованы интегральные микросхемы серии 155.

На лабораторной панели (рис. 8.4) размещены: четырехразрядный реверсивный двоичный счетчик К155ИЕ7, два четырехразрядных сдвиговых регистра К155ИР1, набор логических элементов И—НЕ (К155ЛА3) и ИЛИ—НЕ (К155ЛЕ1), а также тумблеры и кнопки управления режимом работы цифровых устройств. Состояние триггеров счетчика и регистров индицируется светодиодами. Состояние логических устройств можно контролировать с помощью индикаторного светодиода.

В работе предусмотрена возможность ввода числа в сдвиговый регистр 1 параллельным или последовательным кодом. Параллельный код числа задается с помощью тумблеров.

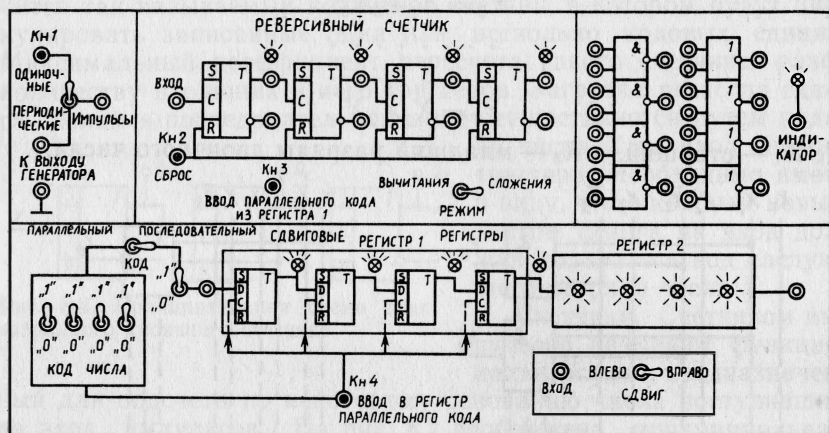


Рис. 8.4. Схема испытательной панели лабораторного стенда

В счетчик число может быть введено параллельным кодом со сдвигового регистра 1 либо последовательным кодом путем подачи на вход счетчика периодических или одиночных импульсов.

Задание

А. Выполняется при подготовке к работе.

1. Изобразить временные диаграммы состояний триггеров трехразрядного счетчика импульсов.

2. Составить на основе логических элементов схему дешифратора на два разряда (четыре выхода).

3. Составить таблицу перевода десятичных чисел от 0 до 15 в двоичный код.

4. Составить схему шифратора в двоичном коде на четыре входа.

Б. Выполняется в лаборатории.

1. Вводя параллельным кодом заданные числа в регистр 1, определить, влияет ли на правильность ввода исходное состояние регистра.

2. Ввести в регистр 1 заданное число последовательным кодом. Переводя введенное число из регистра 1 в регистр 2, убедиться в отсутствии сбоев.

3. Перевести в нулевое состояние оба регистра и ввести в регистр 1 логическую «1». Закольцевать регистры. С помощью генератора импульсов осуществить циркуляцию «единицы» в

кольце регистров. Выявить отсутствие или наличие сбоев при максимальной частоте импульсов сдвига.

4. Подавая на вход счетчика одиночные импульсы, убедиться в его работоспособности. Определить местоположение младших и старших разрядов. Определить значения выходных напряжений, соответствующих логическим «1» и «0».

5. Подключить ко входу счетчика генератор периодических импульсов. Получить на экране осциллографа и зарисовать временные диаграммы изменения состояний триггеров счетчика.

6. Ввести в счетчик с регистра 1 заданное число параллельным кодом. В режиме сложения ввести в счетчик другое заданное число последовательным кодом. Убедиться в правильности выполнения операции сложения двух чисел. Прodelать те же операции в режиме вычитания.

7. Собрать схему дешифратора на два входа. Используя в качестве входных сигналы с выходов двух младших разрядов счетчика, убедиться в работоспособности дешифратора.

8*. Собрать схему шифратора на четыре входа. Убедиться в его работоспособности, подключив входы шифратора к выходам дешифратора (выполняется факультативно).

Методические указания по выполнению лабораторной работы

1. Перед началом работы соединяют выход генератора низкой частоты ГЗ-36А с соответствующими гнездами на панели.

2. Для ввода параллельного кода в регистр 1 устанавливают переключатель КОД в положение ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ и вводят код нажатием на кнопку ввода. Последовательный код вводится путем подачи импульсов на вход устройства сдвига, переключатель КОД при этом должен находиться в положении ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЙ. Для перевода регистра в нулевое состояние в него вводят «нули» любым кодом.

3. При исследовании работы кольцевого счетчика переключатель КОД должен быть установлен в положение ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ.

4. Ввод заданного числа параллельным кодом в реверсивный счетчик осуществляют предварительным вводом кода числа в регистр 1, из которого затем код вводится в счетчик нажатием на соответствующую кнопку ввода.

5. При осциллографическом исследовании работы счетчика осциллограф должен работать в режиме внешней синхронизации. В качестве синхронизирующих используют импульсы с выхода старшего разряда счетчика.

6. Наличие или отсутствие сигналов на выходах дешифратора и шифратора определяют путем соединения с помощью проводника гнезда индикатора с соответствующим гнездом исследуемого устройства.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается преимущество представления чисел в двоичном коде?
2. Что такое регистр и каково его назначение?
3. Как работает счетчик импульсов?
4. От чего зависит количество триггеров в счетчике или регистре?
5. Для чего триггер каждого разряда счетчика имеет два выхода?
6. Где и как могут быть использованы кольцевые счетчики?
7. В чем заключаются преимущества и недостатки параллельного или последовательного способа передачи цифровой информации?
8. Как определить местоположение старших и младших разрядов счетчика или регистра?
9. Чем обеспечивается в работе счетчика переход из режима сложения в режим вычитания?
10. Каким образом вводится в счетчик или регистр заданное число параллельным или последовательным кодом?
11. Что такое дешифратор и как он работает?
12. Как проверить правильную работу элементов и устройств на лабораторной панели?
13. Какие сигналы используются для синхронизации осциллографа?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9

Исследование оптоэлектронных приборов и устройств

Цель работы. Изучение принципа работы и характеристик оптоэлектронных приборов; ознакомление с устройствами, использующими оптоэлектронные приборы.

Краткие теоретические сведения

Оптоэлектронные приборы являются элементной базой оптоэлектроники — сравнительно нового и перспективного направления электронной техники. Оптоэлектроника использует оптические и электронные явления в веществах, их взаимные связи, преобразования для передачи, обработки и хранения информации.

Работа оптоэлектронных приборов основана на принципах электрооптического и фотоэлектрического преобразований, обусловленных генерацией светового излучения при наличии электрического тока в веществе либо изменением электрофизических свойств вещества в результате поглощения им энергии светового излучения.

Свойства оптронов. Оптоэлектронные приборы, представляющие собой единую конструкцию, состоящую из светоизлучателя и фотоприемника, связанных между собой оптически, называют оптронами. Структурная схема оптрона представлена на рис. 9.1.

Входной сигнал, например электрический ток $I_{вх}$, преобразуется в светоизлучателе $СИ$ в световой поток Φ , энергия которого пропорциональна входному сигналу. По оптическому каналу $ОК$ световой поток направляется в фотоприемник $ФП$, где преобразуется в пропорциональное потоку значение выходного электрического тока $I_{вых}$. С помощью устройства управления оптическим каналом $УОК$ можно управлять световым потоком путем изменения физических свойств самого оптического канала.

Таким образом, в оптронах осуществляется двойное преобразование энергии: электрической в световую и световой снова в электрическую. Это придает оптронам ряд совершенно новых свойств и позволяет

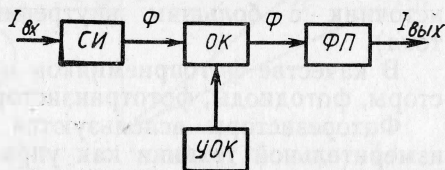


Рис. 9.1. Структурная схема оптрона

на их основе создавать электронные устройства с исключительно своеобразными параметрами и характеристиками, недостижимыми при использовании полупроводниковых и электровакуумных приборов. Так, применение оптронов позволяет осуществить почти идеальную электрическую развязку между элементами устройства (сопротивление до 10^{16} Ом, проходная емкость до 10^{-4} пФ). Кроме того, могут быть эффективно использованы такие свойства оптронов, как односторонность информации, отсутствие обратной связи с выхода на вход, высокая помехозащищенность, широкая полоса пропускания (от нуля до сотен и даже тысяч мегагерц), совместимость с другими (полупроводниковыми) приборами. Это дает возможность использовать оптроны для модулирования сигналов, измерений в высоковольтных цепях, согласования низкочастотных цепей с высокочастотными и низкоомных с высокоомными. Оптоны могут быть использованы также в генераторах импульсов и других импульсных устройствах, в различных датчиках, устройствах позиционирования, тиристорных каскадах с оптическим управлением для переключений в высоковольтных цепях.

К основным недостаткам оптронов следует отнести сильную зависимость их параметров от температуры, низкий коэффициент передачи, низкий КПД и высокий уровень собственных шумов.

В качестве излучателей в оптронах используют обычно светодиоды на основе арсенида-фосфида галлия $GaAsP$, алюминий-арсенида галлия $GaAlAs$, характеризующиеся большой яркостью, высоким быстродействием и длительным сроком службы. Кроме того, они хорошо согласуются по спектральным характеристикам с фотоприемниками на основе кремния. Излучение в светодиодах появляется в результате рекомбинации дырок с инжектированными через p - n -переход электронами. Для этого к светодиоду должно быть приложено напряжение в прямом направлении. Возникающий ток вызывает интенсивную

рекомбинацию носителей заряда с выделением световой энергии. Яркость свечения светодиода, как правило, линейно зависит от прямого тока p - n -перехода. Эффективность излучения светодиодов невелика, в большинстве случаев она не превышает нескольких процентов, что связано с трудностью вывода света из полупроводника наружу.

Вольт-амперная характеристика светодиода аналогична характеристике обычного кремниевого диода. На рабочем участке прямой ветви дифференциальное сопротивление не превышает нескольких ом, поэтому для возбуждения светодиода требуется источник с большим внутренним сопротивлением (источник тока).

В качестве фотоприемников могут использоваться фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы и фототиристоры.

Фоторезисторы используются в устройствах автоматики и измерительной техники как управляемые током или напряжением резисторы. Фотодиоды и фототранзисторы как приемники излучения получили в оптронах наибольшее распространение, поскольку по своим характеристикам и параметрам они могут работать совместно с интегральными микросхемами. Фототиристоры — электронные ключи с тремя p - n -переходами — широко применяются в оптронах в качестве ключевых усилителей мощности, управляемых световым излучением.

Передача светового излучения в оптронах осуществляется через оптический канал, роль которого могут играть различные среды. Назначение оптического канала — передача максимальной световой энергии от излучателя к приемнику. Передающей средой могут быть воздух, различные иммерсионные среды, а также оптические световоды длиной 1 м и более. Стекловолоконные оптические линии связи позволяют довести пробивное напряжение изоляции между входом и выходом оптрона до 150 кВ, что дает возможность применять оптрона для измерений в высоковольтных цепях.

Приведем краткое описание некоторых типов наиболее распространенных промышленных оптронов.

Фотодиодный оптрон. Условное графическое обозначение его приведено на рис. 9.2, а. В качестве излучателя используется светодиод на основе арсенида галлия. График зависимости яркости излучения Φ от тока диода I_d при разных температурах T светодиодов приведен на рис. 9.3. Эти характеристики практически линейны, ток диода ограничен допустимой рассеиваемой мощностью. Отметим, что даже при небольших обратных напряжениях светодиод может быть легко пробит и выведен из строя, поэтому необходимо принимать специальные меры защиты. Как было отмечено, из-за малого динамического сопротивления в прямом направлении светодиоды требуют питания от источника с высоким внутренним сопротивлением. Простейшая схема питания с ограничительным резистором $R_{огр}$ приведе-

на на рис. 9.4, а, а на рис. 9.4, б показана одна из возможных схем управляемого питания светодиода с помощью транзисторного усилителя, коллекторный ток которого зависит от управляющего напряжения $U_{упр}$.

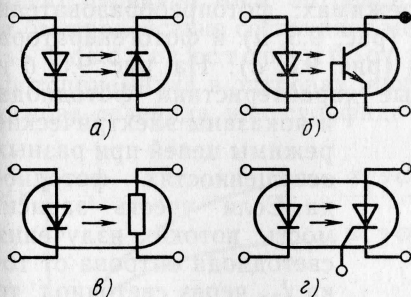


Рис. 9.2. Условные графические обозначения оптронов: фотодиодного (а), фототранзисторного (б), фоторезисторного (в), фототиристорного (г)

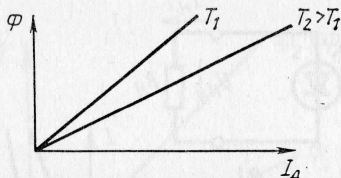


Рис. 9.3. Типичные ампер-яркостные характеристики светодиода при разных температурах

Светодиоды — высокочастотные приборы, их быстродействие составляет 10^{-5} — 10^{-9} с.

В качестве фотоприемников в диодных оптронах используются кремниевые фотодиоды, которые хорошо согласуются по

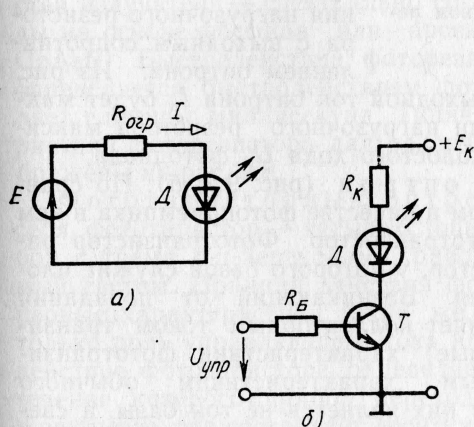


Рис. 9.4. Простая (а) и управляемая (б) схемы питания светодиода

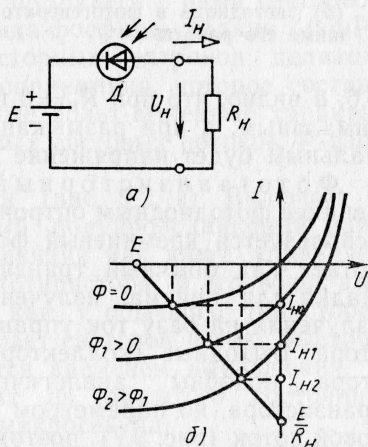


Рис. 9.5. Схема включения (а) и ВАХ (б) светодиода в фотопреобразовательном режиме его работы

спектральным характеристикам и быстродействию с арсенид-галлиевыми светодиодами.

Коэффициент передачи тока диодного оптрона мал ($K_I = 1,0 \div 1,5\%$), однако диодные оптроны являются самыми быстродействующими.

Как элемент электрической цепи фотоприемник диодного оптрона может работать в двух режимах: фотопреобразователя с внешним источником питания (рис. 9.5, а) и фотогенератора без внешнего источника питания (рис. 9.6, а). На рис. 9.5, б и 9.6, б изображены вольт-амперные характеристики фотодиода

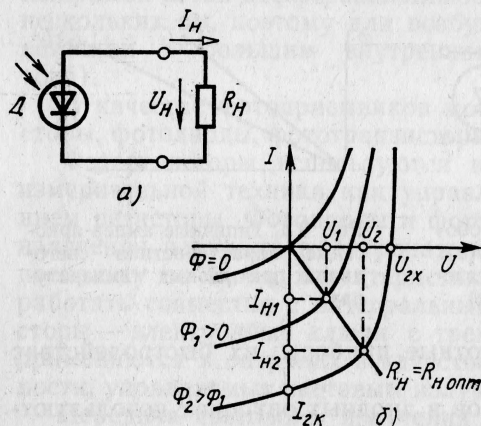


Рис. 9.6. Схема включения (а) и ВАХ (б) светодиода в фотогенераторном режиме его работы

и показаны электрические режимы цепей при разных освещенностях фотодиода. Если учесть зависимость потока излучения светодиода оптрона от тока $I_{вх}$ через светодиод, то можно найти зависимость тока I_H нагрузочного резистора R_H или напряжения U_H на нем от входного тока оптрона, т. е. $I_H = f(I_{вх})$ или $U_H = f'(I_{вх})$.

Надо учитывать, что для передачи максимальной мощности требуется согласование сопротивления нагрузочного резистора с выходным сопротивлением оптрона. Из рис.

9.6, а видно, что при $R_H = 0$ выходной ток оптрона I_k будет максимальным, а при размыкании нагрузочного резистора максимальным будет напряжение холостого хода U_x фотодиода. Фототранзисторный оптрон (рис. 9.2, б). По сравнению с фотодиодным оптроном в качестве фотоприемника в нем используется кремниевый фототранзистор. Фототранзистор работает как обычный транзистор, у которого базой служит площадка для приема излучения. Возникающий от попадания излучения на базу ток управляет коллекторным током транзистора. Выходные (коллекторные) характеристики фототранзистора подобны аналогичным характеристикам обычного транзистора, но параметром у них является не ток базы, а световой поток (рис. 9.7), поэтому электрический вывод базы обычно не используется. Если между эмиттером и коллектором включить напряжение, то появится ток фототранзистора. При попадании светового излучения на базу коллекторный ток возрастает. Таким образом, фототранзистор является усилителем базового тока, поэтому чувствительность его по сравнению с фотодиодом значительно выше. Коэффициент передачи тока фототранзисторного оптрона $K_I = 50 \div 100\%$.

Недостатком фототранзисторов является то, что они по сравнению с фотодиодами гораздо более инерционны и имеют быстродействие 10^{-4} — 10^{-5} с. Находят применение и составные фототранзисторы, включенные по схеме Дарлингтона. Коэффициент передачи тока оптронов на их основе достигает 500%, а быстродействие составляет менее 10^{-4} с.

Фоторезисторный оптрон (рис. 9.2, в). В качестве фотоприемника в оптронах иногда используют фоторезисторы на основе селенида или сульфида кадмия (CdSe , CdS), а в каче-

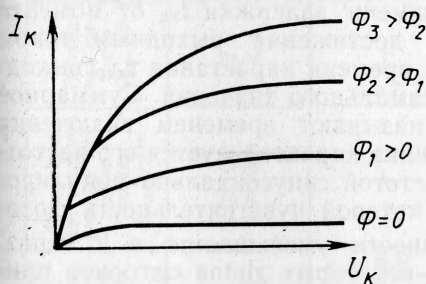


Рис. 9.7. Выходные характеристики фототранзистора

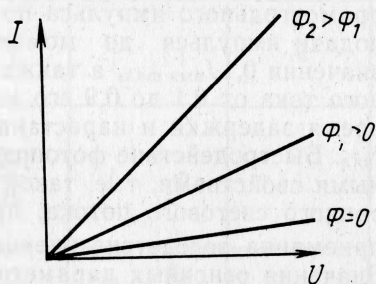


Рис. 9.8. Типичные вольт-амперные характеристики фоторезистора при различных освещенностях

стве излучателя — спектрально согласующиеся с ними светодиоды на основе фосфида или арсенида-фосфида галлия (GaP , GaAsP). Быстродействие фоторезисторных оптронов целиком определяется быстродействием фотоприемника, которое составляет единицы миллисекунд. Типичные вольт-амперные характеристики фоторезистора для различных световых потоков Φ изображены на рис. 9.8.

Фототиристорный оптрон (рис. 9.2, г). Включает в себя фототиристор — четырехслойный полупроводниковый прибор с тремя p - n -переходами, работающий как ключ, управляемый светом. Принцип действия фототиристора и его вольт-амперные характеристики такие же, как у обычного тиристора, только роль управляющего тока играет световой поток. Быстродействие фототиристора определяется временем выключения, в течение которого прибор переходит из открытого состояния в закрытое, оно составляет десятки микросекунд.

Основные параметры оптронов. Входными параметрами оптронов являются: номинальный входной ток в прямом направлении $I_{\text{вх.ном}}$ светодиода и падение напряжения на нем в прямом направлении $U_{\text{вх}}$ при номинальном значении входного тока; входная емкость $C_{\text{вх}}$ в заданном режиме; максимально допустимый входной ток $I_{\text{вх.мах}}$; максимально допустимое обратное напряжение на входе $U_{\text{вх.обр.мах}}$.

Выходными параметрами оптронов являются: максимально допустимое обратное напряжение $U_{\text{вых.обр.мах}}$, прикладываемое к выходу; максимально допустимый выходной ток $I_{\text{вых.мах}}$; выходная емкость $C_{\text{вых}}$; световое $R_{\text{св}}$ и темновое $R_{\text{т}}$ выходные сопротивления (для фоторезисторных оптронов).

Из передаточных параметров основными являются коэффициент передачи тока $K_I = (I_{\text{вых}}/I_{\text{вх}}) \cdot 100$, либо дифференциальный коэффициент передачи тока $K_{I\text{д}} = (dI_{\text{вых}}/dI_{\text{вх}}) \cdot 100$, выраженные в процентах.

Быстродействие оптрона оценивают при подаче на его вход прямоугольного импульса по времени задержки $t_{\text{зд}}$ от момента подачи импульса до момента достижения выходным током значения $0,1 I_{\text{вых.мах}}$, а также по времени нарастания $t_{\text{нар}}$ выходного тока от 0,1 до 0,9 его максимального значения. Суммарное время задержки и нарастания называют временем включения $t_{\text{вкл}}$. Быстродействие фотоприемника характеризуется его частотными свойствами, т. е. такой частотой синусоидально модулированного светового потока, при которой чувствительность фотоприемника вследствие инерционности уменьшается в $\sqrt{2}$ раз. Значения основных параметров некоторых типов оптронов приведены в табл. 9.1.

Применение оптронов. В зависимости от типа фотоприемника оптроны могут применяться в электронных устройствах для переключения, преобразования, согласования, модуляции и т. д. Они могут использоваться также в качестве малогабаритных импульсных трансформаторов, реле для коммутации напряжений и токов, в автогенераторах, цепях обратной связи и т. д. Следует подчеркнуть, что, несмотря на наличие развязки между входом и выходом, полоса пропускания оптрона начинается с нулевой частоты.

Оптроны с открытым оптическим каналом служат в качестве различных датчиков (перемещения, «края объекта» и др.). В устройствах передачи информации часто применяют оптоэлектронные интегральные микросхемы, в которых в одном корпусе объединены оптрон и интегральная микросхема. Фотоприемник такой микросхемы может быть изготовлен в том же кристалле кремния, что и транзисторная микросхема, как одно целое.

На рис. 9.9 изображена схема генератора импульсов, в котором в качестве импульсного трансформатора в цепи положительной обратной связи использован диодный оптрон. Генератор работает следующим образом. В момент подачи напряжения питания в резисторе R_1 и в базе транзистора появляется ток. Если произведение коэффициентов передачи тока транзистора T и диодного оптрона $ОД$ больше единицы, то благодаря положительной обратной связи транзистор лавинообразно переходит в режим насыщения. Коллекторный ток транзистора становится максимальным, сопротивление фотодиода оптрона резко умень-

Таблица 9.1

Тип оптрона	Коэффициент передачи тока $K_f, \%$	Время включения, выключения $t_{вкл}, t_{выкл}, \text{мкс}$	Время нарастающего спада $t_{нар}, \text{сп}, \text{нс}$	Выходные сопротивления — темновое, световое $R_T/R_{св}, \text{Ом}$	Сопротивление изоляции между выходом и входом $R_{изол}, \text{Ом}$	Пропускная емкость $C_{пр}, \text{пФ}$	Области применения
Фотодиодный: АОД101А, АОД120А (бескорпусный)	1,0 1,0	— —	100 30	— —	$\geq 10^9$ $\geq 10^{10}$	2 2	Изолированный источник, гальваническая развязка, аналоговый элемент
Фототранзисторный: АОТ102Б (однопереходный двухбазовый), АОТ123А, АОТ110Г (составной)	0,6 50 800	≤ 5 — $\leq 50/\leq 100$	— 2000 —	5000/500 (между базами при разомкнутом эмиттере) — —	— $\geq 10^9$ $\geq 10^3$	— — —	Переключение логических сигналов, цифровые устройства
Фоторезисторный: ОЭП-2 (излучатель — лампа накаливания), ОЭП-7 (излучатель — светодиод)	— —	≤ 200 ≤ 120	— —	$\geq 3 \cdot 10^7/500$ $\geq 10^6/\leq 2 \cdot 10^3$	— —	— —	Элементы автоматики и измерительной техники, аналоговые преобразователи
Фототиристорный: АОУ103А	—	15/100	—	—	—	3	Коммутация больших токов

шается, конденсатор начинает заряжаться. По мере его зарядки ток базы уменьшается, а ток коллектора не изменяется, поскольку транзистор продолжает оставаться в режиме насыщения. Когда ток зарядки уменьшится до значения, соответствующего границе насыщения, транзистор переходит в обычный усилительный режим. Благодаря положительной обратной связи происходит резкий переход транзистора в режим отсечки и конденсатор перезаряжается по цепи R_1-C-R_2 , стремясь зарядиться до напряжения источника питания. Как только потенциал базы

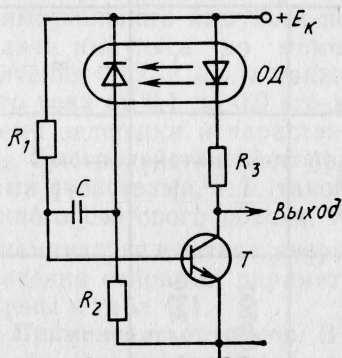


Рис. 9.9. Принципиальная схема оптрона генератора импульсов

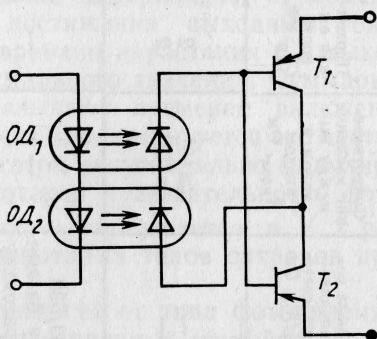


Рис. 9.10. Схема электронного коммутатора на микросхеме К249КН1А-Е

поменяет знак, происходит лавинообразный переход транзистора в режим насыщения и процесс снова повторяется.

Приведем приближенные формулы для расчета длительностей импульса t_n и паузы t_p при $R_1 \gg R_2$ [8]: $t_n \approx R_2 C \ln(\beta K_I)$; $t_p \approx (R_1 + R_2) C \ln[1 + (R_2/\beta R_3)(\beta K_I - 1)]$, где β — коэффициент передачи тока транзистора, а K_I — коэффициент передачи тока оптрона.

На рис. 9.10 приведена электрическая схема оптоэлектронной микросхемы типа К249КН1А-Е. Микросхема предназначена для коммутации аналоговых сигналов, в частности сигналов от измерительных датчиков. Фотодиоды оптронов $ОД_1$ и $ОД_2$ работают в фотогенераторном режиме, а поскольку ЭДС одного фотодиода недостаточна для надежного отпираания транзисторов T_1 и T_2 , в управляющую цепь включены последовательно два оптрона. Оптоны в данном устройстве играют роль импульсного трансформатора, однако по сравнению с ним обладают таким преимуществом, как возможность передачи сигналов постоянного тока при полном отсутствии помех с выхода на вход. Конструктивно фотодиоды оптронов изготавливают на том же кристалле, что и транзисторы, как единое целое.

Широкое применение при построении логических устройств находят также оптронные интегральные схемы (ОИС) для согласования интегральных микросхем между собой и с дискретными элементами. Так, например, цифровая ОИС К249ЛП1 (рис. 9.11) представляет собой объединенные в одном корпусе диодный оптрон и сложный инвертор на базе ИМС серии 155. Управление осуществляется входным током светодиода оптрона $I_{\text{вх}}$, наличие или отсутствие которого обуславливает появление на выходе напряжения $U_{\text{вых}}$ высокого (логическая «1»), либо низкого (логический «0») уровня. Высокое быстродействие устройства, практически идеальная развязка между входом и выходом, а также наличие на выходе стандартного перепада напряжений позволяют при согласовании обойтись без дополнительных устройств.

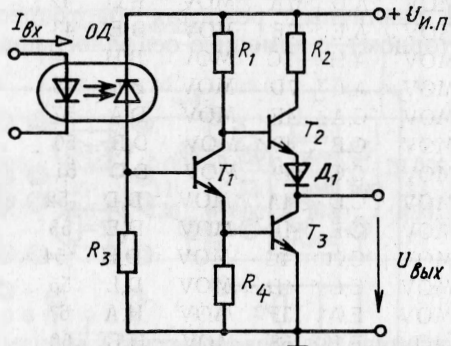


Рис. 9.11. Схема переключателя на микросхеме К249ЛП1

Описание лабораторной панели

Схема испытательной панели лабораторного стенда изображена на рис. 9.12. На панели размещены исследуемые оптроны: резисторный, диодный, транзисторный, с составным транзистором. Электрические выводы светоизлучателей и фотоприемников оптронов соединены с гнездами на лицевой стороне панели.

В левой верхней части панели расположен согласующий усилитель с известным коэффициентом передачи (указан на панели) для подачи переменного сигнала с генератора низкой частоты (например, ГЗ-36А) на вход исследуемого оптрона (светодиода). В усилителе предусмотрена регулировка начального тока оптрона. Индикатором работы усилителя служит выведенный на панель светодиод, включенный последовательно с нагрузочным устройством (оптроном). Амплитуда тока светодиода оптрона устанавливается с помощью регулятора выходного напряжения генератора низкой частоты (ГЗ-36А) с учетом коэффициента передачи согласующего усилителя. Начальный ток светодиода оптрона можно контролировать с помощью вольтметра или осциллографа путем измерения падения напряжения на резисторе R_{01} сопротивлением 10 Ом, включенном последовательно со светодиодом исследуемого оптрона.

В правой верхней части панели смонтирована электрическая цепь для исследования выходных характеристик оптронов. Цепь

состоит из нагрузочного переменного резистора R_H и измерительного резистора R_{02} сопротивлением 10 Ом для исследования выходных сигналов оптронов, в том числе диодных оптронов в различных режимах (фотопреобразовательном, фотогенераторном), с помощью осциллографа.

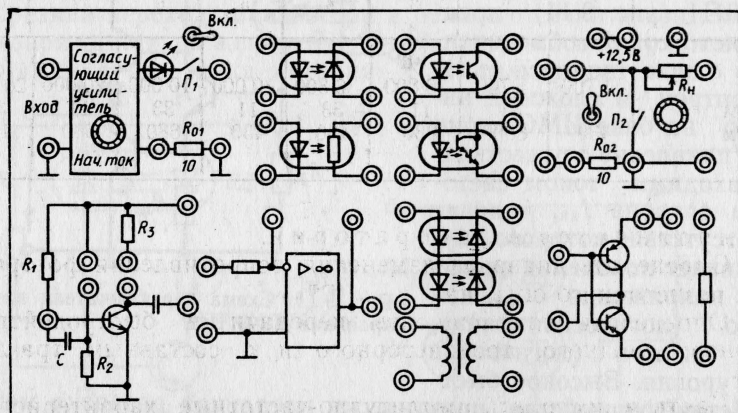


Рис. 9.12. Схема испытательной панели лабораторного стенда

В нижней части панели расположены полусборки исследуемых электронных устройств: генератора импульсов с диодным оптроном в цепи обратной связи, модулятора на основе операционного усилителя с управляемым по оптическому каналу сопротивлением в цепи обратной связи и транзисторного ключа для коммутации аналоговых сигналов, управляемого диодными оптронами. Для сравнения частотных характеристик ключа при различных способах управления предусмотрено трансформаторное управление ключом. Для генератора импульсов и модулятора используются оптроны, установленные на панели.

В верхней части панели выведены гнезда источника постоянного напряжения +12,5 В.

Задание

А. Выполняется при подготовке к работе.

1. Изучить основные характеристики оптронов.
2. Изобразить схемы включения исследуемых оптронов для определения коэффициента передачи, быстродействия, а также характеристик диодного оптрона в фотогенераторном режиме.

3. Определить минимальный коэффициент передачи тока транзистора в схеме генератора импульсов при использовании диодного оптрона АОД101А. Рассчитать длительность импульсов и период их повторения для схемы с транзистором КТ342Б. Ис-

ходные данные для расчета выходных параметров оптронного генератора импульсов приведены в табл. 9.2.

Таблица 9.2

Элемент схемы	Номер бригады							
	1	2	3	4	5	6	7	8
C, пФ	4 700	4 700	6 800	6 800	10 000	10 000	20 000	20 000
R ₁ , кОм	11	33	11	33	11	33	11	33
R ₂ , кОм	430	680	680	430	430	680	680	430

Б. Выполняется в лаборатории.

1. Определить диапазон изменения сопротивления фоторезистора резисторного оптрона.

2. Определить коэффициенты передачи и быстродействие оптронов: диодного, транзисторного и с составным транзистором.

3. Снять и построить амплитудно-частотные характеристики диодного и транзисторного оптронов.

4. Собрать цепь для исследования диодного оптрона в фотогенераторном режиме. Определить ЭДС и ток короткого замыкания фотодиода для входных токов $I_{вх} = I_{вх. ном}$ и $I_{вх} = 0,5 I_{вх. ном}$. При тех же входных токах снять внешние характеристики для трех-четырёх значений R_n .

5. Собрать схему оптронного генератора импульсов, включив в нее диодный оптрон. Зарисовать осциллограммы базового и коллекторного напряжений транзистора. Определить длительность импульса и частоту генерируемых колебаний.

6. Собрать схему модулятора, включив в цепь обратной связи операционного усилителя фоторезистор резисторного оптрона. Промодулировать импульсы с выхода оптронного генератора (п. 5) синусоидальным напряжением генератора низкой частоты (типа ГЗ-36А). Определить диапазон изменения амплитуды импульсов на выходе модулятора.

7. Собрать цепь, состоящую из источника постоянного напряжения, нагрузочного резистора R_n и электронного коммутатора с управлением по оптическому каналу. Управляя коммутатором прямоугольными импульсами напряжения с генератора (типа ГЗ-36А), наблюдать кривые напряжения на резисторе R_n с помощью осциллографа при изменении частоты генератора от 20 Гц до 200 кГц. Зарисовать осциллограммы напряжения на резисторе R_n для крайних частот и для частоты 1 кГц.

8*. Прodelать те же эксперименты, что и в п. 7, при управлении коммутатором с помощью импульсного трансформатора (выполняется факультативно).

1. При сборке цепей внимательно следят за правильностью подключения светодиодов к источнику сигнала. Светодиод включают в цепь в прямом направлении, в противном случае он может быть легко пробит обратным напряжением. Необходимо также контролировать форму исследуемого сигнала на выходе согласующего усилителя, следя за тем, чтобы сигнал не был искажен.

2. При измерении сопротивления фоторезистора ток через светодиод оптрона регулируют ручкой «Нач. ток» при отсутствии переменного сигнала на входе усилителя.

3. Для измерения коэффициента передачи тока оптронов используют нагрузочную цепь с резистором R_n . Ток фотоприемника определяют путем измерения падения напряжения на измерительном резисторе R_{02} , имеющем сопротивление 10 Ом. Необходимо иметь в виду, что фотодиод в цепи с источником питания должен быть включен в обратном направлении. Быстродействие оптронов определяют путем измерения с помощью осциллографа параметров сигнала на выходе оптронов при подаче на вход согласующего усилителя прямоугольных импульсов с выхода генератора низкой частоты (ГЗ-36А). Целесообразно осуществить внешнюю синхронизацию осциллографа выходными импульсами этого генератора.

4. Исследование диодного оптрона в фотогенераторном режиме осуществляют при отсутствии переменного сигнала на входе согласующего усилителя. Ток светодиода устанавливают ручкой «Нач. ток». Ток короткого замыкания фотодиода оптрона определяют с помощью измерительного резистора R_{02} , переключатель P_2 при этом должен быть установлен в положение «Вкл.».

5. При выполнении п. 6 задания модулируемый сигнал с выхода оптронного генератора, установленного на панели, подается на вход модулятора. Модулирующий синусоидальный сигнал частотой 200—600 Гц подается с генератора типа ГЗ-36А через согласующий усилитель на вход резисторного оптрона.

6. При работе с электронным коммутатором управляющий сигнал с генератора низкой частоты (типа ГЗ-36А) подается непосредственно на входы диодных оптронов (либо на первичную обмотку импульсного трансформатора).

Контрольные вопросы

1. Что такое оптрон? Какие имеются типы оптронов?
2. Какие физические принципы положены в основу работы оптоэлектронных приборов?
3. Каковы основные достоинства и недостатки оптронов?
4. Какова роль оптического канала в оптроне?
5. Укажите основные характеристики и параметры оптронов.

6. Для чего необходимо согласование спектральных характеристик светового излучателя и фотоприемника?
7. Чем отличаются фотопреобразовательный и фотогенераторный режимы работы фотодиода?
8. Чем объясняется низкий коэффициент передачи тока у фотодиодных оптронов?
9. Почему коэффициент передачи тока фототранзисторного оптрона значительно больше, чем у фотодиодного?
10. Сравните различные типы оптронов по быстродействию.
11. Почему светодиод оптрона должен быть включен в цепь источника питания с высоким внутренним сопротивлением?
12. Каким образом можно обеспечить начальный ток фототранзистора?
13. Какие предосторожности следует соблюдать при подключении входной цепи оптрона к источнику сигнала?
14. Что называется предельной частотой модуляции светового потока применительно к оптоэлектронным приборам?
15. Как работает фотодиодный оптрон в схеме генератора импульсов (см. рис. 9.9)?
16. Какова роль фотодиодных оптронов в электронном коммутаторе (см. рис. 9.10)? В каком режиме работают фотодиоды?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10

Исследование аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей

Цель работы. Ознакомление с принципом работы АЦП и ЦАП, исследование точности преобразования аналоговых и цифровых величин с их помощью.

Краткие теоретические сведения

При создании устройств для связи между собой объектов, использующих информацию в дискретной и непрерывной формах, применяют преобразователи аналоговых сигналов в цифровые (АЦП) и цифровых сигналов в аналоговые (ЦАП).

АЦП служат для преобразования исходной аналоговой величины в соответствующий ей цифровой код, являющийся выходным сигналом преобразователя. Они могут обеспечивать квантование входной величины как по уровню, так и по времени.

ЦАП обеспечивают получение на выходе аналоговой величины, соответствующей цифровой кодовой комбинации, поступившей на вход. Аналоговая величина воспроизводится для дискретных моментов времени.

Иллюстрация одного из возможных применений рассматриваемых устройств дана на рис. 10.1. Объект управления снабжен датчиками для получения информации о параметрах процессов

(например, температуры и давления), необходимой для управления объектом. Обычно на выходах датчиков получаются аналоговые величины, поэтому для ввода информации в ЭВМ требуется наличие АЦП. После обработки информации на ЭВМ получается код, характеризующий результаты обработки. Этот код определяет операции, которые должны выполнить некоторые вспомогательные устройства, чтобы воздействовать на органы управления, обеспечивая правильное функционирование объекта. На органы управления очень часто должны воздействовать аналоговые сигналы и для формирования их из кода используется ЦАП. Обычно все АЦП и ЦАП входят в состав блока обмена информацией (БОИ). Кроме указанного применения АЦП широко используются в цифровых измерительных приборах.

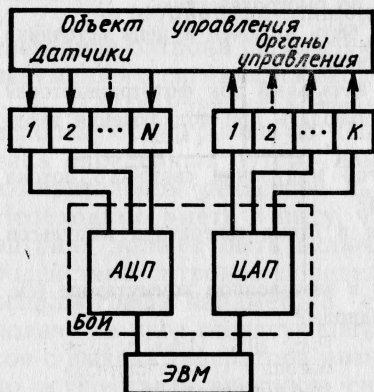


Рис. 10.1. Применение АЦП и ЦАП в схемах управления

Алгоритм работы АЦП и ЦАП представляет собой преобразование, посредством которого устанавливается соответствие между аналоговой величиной, поданной на вход АЦП или получающейся на выходе ЦАП, и цифровым кодом, получающимся на выходе АЦП или поданным на вход ЦАП. В данной лабораторной работе рассматриваются устройства, в которых аналоговой величиной является напряжение.

Наибольшее распространение получили три метода преобразования аналоговой величины в цифровой (двоичный) код:

1. Метод последовательного уравнивания (рис. 10.2). Здесь входная аналоговая величина уравнивается суммой одинаковых минимальных эталонов величины ΔU , иногда называемых квантами. Создается последовательность вида $n\Delta U$. В момент времени t_n , когда значение элемента последовательности $n_i\Delta U$ отличается от аналоговой величины U меньше чем на ΔU , число квантов n_i преобразуется в выходной код. Сравнение в этом методе производится с помощью одного сравнивающего устройства.

2. Метод поразрядного уравнивания (рис. 10.3). В этом методе входная аналоговая величина U последовательно сравнивается с суммой эталонов, имеющих значение 2^i квантов. Таким образом, значения двух соседних эталонов отличаются в два раза. Сравнение начинается с эталона, имеющего максимальное значение. В зависимости от результата сравнения этого эталона с входной величиной получается цифра в старшем разряде последовательного двоичного кода. Если

эталон больше входной величины, то в старшем разряде ставится 0 и дальше производится сравнение входной величины со следующим эталоном вдвое меньшего значения. Если эталон не превышает входной величины, то в соответствующем разряде кода ставится 1. Аналогично производится сравнение для всех эталонов. По окончании уравнивания будет образован код, соответствующий сумме тех эталонов, у которых в соответствующих местах кода стоят 1. В этом методе сравнение также производится с помощью одного сравнивающего устройства.

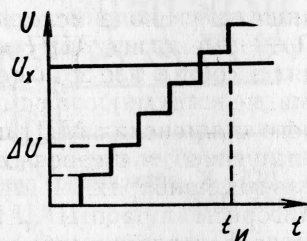


Рис. 10.2. Иллюстрация метода последовательного уравнивания

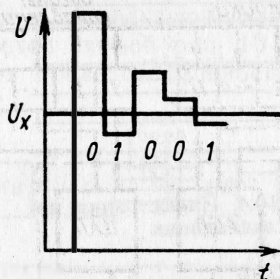


Рис. 10.3. Иллюстрация метода поразрядного уравнивания

3. Метод считывания. В этом методе используется набор из $2^n - 1$ эталонов. Младший из эталонов равен одному кванту, следующие — двум, трем квантам и т. д. Входная величина одновременно сравнивается со всеми эталонами. Это иллюстрируется рис. 10.4. Результатом является код в виде сигналов на выходах сравнивающих устройств.

Сравнение рассмотренных методов показывает, что достоинством метода последовательного уравнивания является простота аппаратной реализации, поскольку требуется только один эталон, недостатком — большое количество шагов, которые необходимо сделать для уравнивания, т. е. этот метод преобразования самый медленный. В противоположность ему достоинством метода считывания является быстродействие, недостатком — наличие большого числа эталонов и сравнивающих устройств, т. е. сложность аппаратной реализации. Промежуточное место занимает метод поразрядного уравнивания. Он обладает приемлемым быстродействием и прост в реализации.

Принцип действия ЦАП поясняется схемой рис. 10.5. Основу ЦАП составляет совокупность резисторов (матрица), подключаемых ко входу операционного усилителя (ОУ) с помощью ключей. Совместно с резистором R_1 эта матрица образует цепь отрицательной обратной связи, охватывающую ОУ. С учетом соотношений сопротивлений резисторов, подключаемых ко вхо-

ду, выходное напряжение ЦАП определяется выражением

$$U_{\text{вых}} = -U_{\text{оп}} \frac{R_1}{R_0} (Z_0 + 2Z_1 + 4Z_2 + 8Z_3), \quad (10.1)$$

где Z_0, Z_1, Z_2, Z_3 — коэффициенты, принимающие значение 0, если соответствующий ключ разомкнут, или 1, если ключ замкнут.

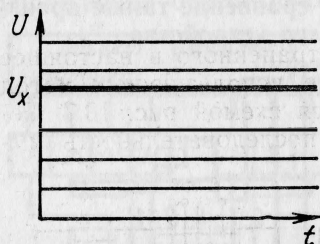


Рис. 10.4. Иллюстрация метода считывания

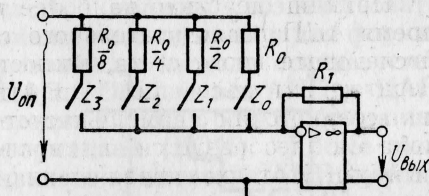


Рис. 10.5. К объяснению принципа действия ЦАП

Таким образом, четырехразрядный двоичный код преобразуется в уровень выходного напряжения в диапазоне от 0 до $15\Delta U$, где ΔU — шаг квантования. Для уменьшения погрешности квантования необходимо увеличить разрядность ЦАП, т. е. число двоичных разрядов.

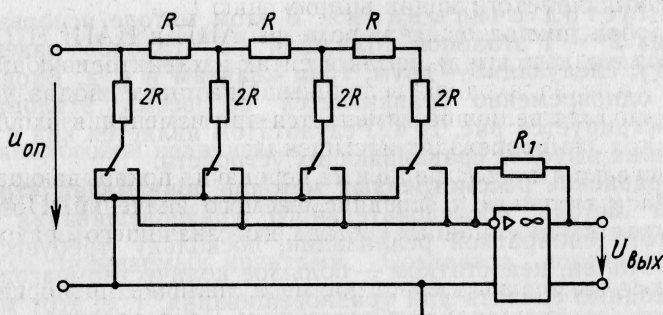


Рис. 10.6. Схема ЦАП с матрицей резисторов

Недостатками этой простейшей схемы ЦАП являются, во-первых, жесткие требования к точности и стабильности резисторов, во-вторых, изменение нагрузки источника $U_{\text{оп}}$ в зависимости от положения ключей, что требует уменьшения внутреннего сопротивления источника опорного напряжения, т. е. стабилизации напряжения $U_{\text{оп}}$.

Эти недостатки устранены в схеме ЦАП, показанной на рис. 10.6. В ней используются более сложные ключи, которые подсоединяют резисторы сопротивлением $2R$ либо ко входу

операционного усилителя, либо к общей шине. Все резисторы объединены в матрицу типа $R-2R$, имеющую постоянное входное сопротивление со стороны источника опорного напряжения. Здесь образуется также цепь обратной связи, а выходное напряжение определяется выражением, аналогичным (10.1):

$$U_{\text{вых}} = -U_{\text{оп}} \frac{R_1}{16R} (Z_0 + 2Z_1 + 4Z_2 + 8Z_3).$$

Принцип действия наиболее распространенного в настоящее время АЦП последовательного типа, т. е. использующего метод последовательного счета, иллюстрируется схемой рис. 10.7. Генератор импульсов ГИ вырабатывает последовательность импульсов, которая с помощью счетчика Сч преобразуется в двоичный код. Этот код управляет ключами цифро-аналогового преобразователя ЦАП. Выходное напряжение ЦАП поступает на один из входов компаратора К, где оно сравнивается с входным напряжением $U_{\text{вх}}$, поданным на другой вход компаратора. При равенстве напряжений $U_{\text{вх}}$ и $U_{\text{ЦАП}}$ компаратор выдает сигнал, останавливающий работу генератора импульсов. При этом на выходе счетчика Сч фиксируется двоичный код, соответствующий напряжению $U_{\text{вх}}$.

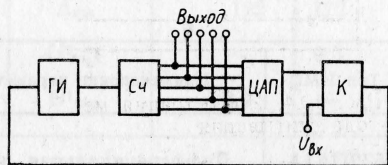


Рис. 10.7. Структурная схема АЦП

Перечислим основные параметры АЦП и ЦАП:

разрядность, выражаемая в битах и характеризующая диапазон изменения входной величины. При этом подразумевается, что выходная величина изменяется при изменении входной величины, т. е. не происходит насыщения;

погрешность коэффициента передачи, показывающая разницу действительного и предписываемого значений. Погрешность указывается в единицах младшего значащего разряда (ед. МЗР);

линейность характеристики, т. е. наличие пропорциональности между эталоном, образующим определенное значение аналоговой величины, и кодом, соответствующим этому значению.

В паспортных данных обычно указывается параметр, противоположный линейности, т. е. нелинейность δ_L (или погрешность преобразования), определяемая как абсолютное отклонение точек характеристики преобразования от прямой. Нелинейность указывается в единицах младшего значащего разряда (ед. МЗР). Дифференциальной нелинейностью называется максимальное отклонение друг от друга двух аналоговых сигналов, соответствующих последовательной смене кодов младшего значащего разряда (ед. МЗР).

Эти основные параметры и будут предметом изучения в данной работе.

В качестве примера приведем основные параметры ЦАП и АЦП серии 572, требующих для своей работы определенных вспомогательных устройств. Для сравнения ниже приведены параметры функционально законченного АЦП, содержащего все необходимые для нормальной работы устройства.

Цифро-аналоговый преобразователь К572ПА1 (А—Г) представляет собой полупроводниковую интегральную микросхему ЦАП, предназначенную для устройств преобразования информации в электронной аппаратуре различного назначения и устройств ввода и вывода ЭВМ. Основные параметры ЦАП приведены в табл. 10.1.

Т а б л и ц а 10.1

Тип ИМС	Наименование параметра	Обозначение	Не менее	Не более
К572ПА1А К572ПА1Б К572ПА1В К572ПА1Г	Дифференциальная нелинейность, % от полной шкалы, при $t = (25 \pm 10)^\circ\text{C}$	$N_{\text{диф}}$	—0,1 —0,2 —0,4 —0,8	0,1 0,2 0,4 0,8
К572ПА1 (А—Г)	Разрядность, бит Погрешность коэффициента передачи, % от полной шкалы, при $t = (25 \pm 10)^\circ\text{C}$	R КП	10 —3	3
	Время установления выходного тока, мкс	$t_{\text{уст}}$		5

Аналого-цифровой преобразователь К572ПВ1 (А, Б, В) представляет собой полупроводниковую интегральную микросхему маломощного АЦП на 12 двоичных разрядов, предназначенную для работы в электронной аппаратуре широкого применения. Этот преобразователь выполняет функцию АЦП последовательного типа совместно с внешним компаратором (усилителем) с выводом параллельного двоичного кода. Основные параметры АЦП приведены в табл. 10.2.

Функционально законченный, т. е. в отличие от АЦП серии 572 не требующий для своей работы вспомогательных устройств кроме источника питания, аналого-цифровой преобразователь К1113ПВ1 (А, Б, В) представляет собой полупроводниковую БИС на 8—10 двоичных разрядов, предназначенную для работы в электронной аппаратуре широкого применения. Этот преобразователь выполняет функцию АЦП последовательного типа.

БИС имеет встроенные источник опорного напряжения, тактовый генератор и компаратор напряжения. Для применения АЦП необходим только источник питания. АЦП сопрягается с

микропроцессорами, его основные параметры приведены в табл. 10.3.

Т а б л и ц а 10.2

Тип. ИМС	Наименование параметра	Обозначение	Не менее	Не более
K572ПВ1А K572ПВ1Б K572ПВ1В	Нелинейность, ед. МЗР	N	—2 —4 —8	2 4 8
K572ПВ1А K572ПВ1Б K572ПВ1В	Дифференциальная нелинейность, ед. МЗР	$N_{\text{диф}}$	—4 —8 —16	4 8 16
	Погрешность, ед. МЗР	$\Delta_{\text{пш}}$	—122	122
K572ПВ1А K572ПВ1Б K572ПВ1В	Выходное напряжение низкого уровня, В	$U^0_{\text{вых}}$	—	0,3
	Выходное напряжение высокого уровня, В	$U^1_{\text{вых}}$	2,4	—

Т а б л и ц а 10.3

Тип ИМС	Наименование параметра	Обозначение	Не менее	Не более
K1113ПВ1А K1113ПВ1Б K1113ПВ1В	Нелинейность, ед. МЗР	N	—1 —2 —4	1 2 4
K1113ПВ1А K1113ПВ1Б K1113ПВ1В	Дифференциальная нелинейность, ед. МЗР	$N_{\text{диф}}$	—1 —2 —4	1 2 4
K1113ПВ1 (А, Б, В)	Абсолютная погрешность преобразования в конечной точке шкалы, ед. МЗР	$\Delta_{\text{пш}}$	—4	4

Описание лабораторной панели

На лабораторной панели (рис. 10.8) размещены генератор импульсов ГИ и генератор одиночных импульсов ГОИ с соответствующими регулировками «Частота» и «Пуск». При нажатии кнопки «Пуск» вырабатывается один импульс. Любой из этих генераторов с помощью ручки «Ручн. — авт.» можно подключить ко входу счетчика, состояние которого индицируется светодиодным индикатором. Выход счетчика подключен ко входу ЦАП, выход которого в свою очередь подключен к одному из входов компаратора К. На другой вход компаратора может быть подано напряжение $U_{\text{вх}}$. Выход компаратора управляет

работой генератора импульсов *ГИ*. На выходе цифро-аналогового преобразователя и источника напряжения $U_{\text{вх}}$ установлены гнезда для подключения вольтметра. Кроме того, к выходу ЦАП можно подключить осциллограф.

Задание

А. Выполняется при подготовке к работе.

1. В таблице для снятия характеристики преобразования 10-разрядного ЦАП записать двоичные коды для значений числа входных импульсов от 0 до 1024 с интервалом 2^5 . Результаты дать в виде табл. 10.4.

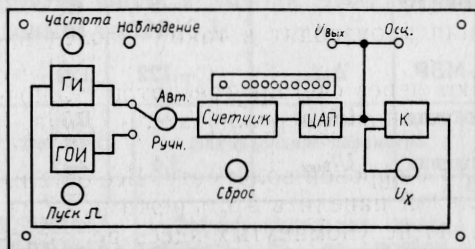


Рис. 10.8. Схема испытательной панели лабораторного стенда

Б. Выполняется в лаборатории.

1. Снять характеристику преобразования ЦАП и определить дифференциальную нелинейность.

2. Установить минимальную частоту генератора импульсов и снять

характеристику преобразования АЦП. Определить погрешность преобразования и дифференциальную нелинейность.

3. Переключить схему в режим «Наблюдение» и для трех различных значений $U_{\text{вх}}$ зарисовать с экрана осциллографа изменяющиеся ступени напряжения.

Таблица 10.4

Число одичных импульсов	Код	Предписанное значение выходного напряжения ЦАП $U_{\text{предп}}$	Измеренное значение выходного напряжения ЦАП $U_{\text{изм}}$	$\Delta U = U_{\text{предп}} - U_{\text{изм}}$
0	000000000	0		
32	000010000	0,032		
64	000100000	0,064		
96	000110000			
1023	111111111	0,999		

4. Снять зависимость выходного кода АЦП в функции частоты генератора импульсов для одного значения $U_{\text{вх}} = 0,5 \text{ В}$.

Прежде всего следует иметь в виду, что исследуемые в работе устройства являются преобразователями высокой точности. Определяемые экспериментально погрешности весьма малы (десятые доли процента), поэтому при выполнении работы необходима исключительная аккуратность. Получение правильных результатов возможно только при использовании цифровых вольтметров высокого класса (например, В7-27). Применение вольтметров со стрелочным индикатором в данной работе недопустимо, поскольку их собственная погрешность превышает погрешность исследуемых устройств.

1. Выполнение п. 1 задания производят в такой последовательности.

Ко входу ЦАП подключают через счетчик генератор одиночных импульсов (ГОИ) путем установки переключателя «Ручн.—авт.» в положение «Ручн.».

К выходу ЦАП подключают цифровой вольтметр. Все остальные устройства на испытательной панели в этом режиме не используются, поэтому положение не упомянутых здесь регуляторов безразлично.

Путем нажатия кнопки «Пуск» ГОИ подают импульсы на счетчик, которые поступают на ЦАП.

Задавая от ГОИ входную величину, отсчитываемую в двоичном коде, измеряют выходное напряжение ЦАП. С целью сокращения объема работы измерения проводят не во всех 1024 точках, а в 32 точках, отстоящих одна от другой на 2^5 импульсов. В случае необходимости уточнения положения характеристики можно провести измерения в промежуточных точках.

Измерение числа входных одинаковых импульсов осуществляют в двоичном коде по светодиодному индикатору. Устанавливают по этому индикатору числа, записанные при подготовке к работе (в п. 1).

По результатам измерений, записанных в таблице задания, строят характеристику преобразования ЦАП, представляющую собой зависимость выходного напряжения от числа импульсов на входе, т. е. зависимость $U_{\text{вых}} = f(N)$.

Нелинейность δ_L , или погрешность, преобразования можно непосредственно получить из построенной характеристики преобразования, если нанести на нее прямую линию, соединяющую последнюю точку характеристики с началом координат.

Поскольку в работе измерения проведены через 32 ед. МЗР, дифференциальную нелинейность получают делением максимальной разности на 32.

2. При выполнении п. 2 задания ко входу счетчика подключают генератор импульсов (ГИ) путем установки переключателя «Ручн.—авт.» в положение «Авт.». Устанавливают минимальную частоту генератора импульсов.

Подключают вольтметр к выходу источника входного напряжения $U_{вх}$. Устанавливая произвольные значения входного напряжения $U_{вх}$, записывают показания светодиодного индикатора, соответствующие двоичному коду на выходе счетчика. Здесь следует иметь в виду, что знак показаний счетчика указывается самым левым светодиодом красного цвета, причем светодиод указывает на то, что знак напряжения $U_{вх}$ отрицательный.

Удобнее устанавливать те значения $U_{вх}$, которые были получены на выходе ЦАП при выполнении п. 1 задания.

3. При выполнении п. 3 задания необходимо подключить к выходу ЦАП осциллограф и установить максимальное время развертки, после чего нажать кнопку «Наблюдение». При этом на вход ЦАП поданы импульсы очень низкой частоты (единицы герц) и на экране будет наблюдаться изображение, подобное рис. 10.2, соответствующее методу последовательного уравнивания. Изображение с экрана нужно зарисовать.

4. При выполнении п. 4 задания исследуют быстроедействие АЦП. Для этого изменяют частоту импульсов генератора при неизменном входном напряжении $U_{вх}$. Измерение частоты импульсов осуществляют с помощью осциллографа. По результатам измерений строят зависимость показаний счетчика от частоты импульсов и определяют зависимость погрешности от частоты.

Контрольные вопросы

1. Каково назначение АЦП и ЦАП?
2. Какие методы преобразования используют в АЦП?
3. Чем определяется погрешность преобразования при методе последовательного уравнивания?
4. Чем определяется погрешность преобразования при методе поразрядного уравнивания?
5. Чем определяется погрешность преобразования при методе считывания?
6. Каковы достоинства и недостатки основных методов преобразования?
7. Что такое линейность шкалы АЦП?
8. Что такое равномерность шкалы АЦП?
9. Чем определяется диапазон изменения входного напряжения АЦП?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11

Исследование микропроцессора

Цель работы. Ознакомление с основными характеристиками микропроцессорной системы «Микролаб КР580ИК80», изучение порядка выполнения основных команд, работа с устройствами ввода — вывода.

Микропроцессорная система для программной обработки информации (рис. 11.1) состоит из трех основных блоков: микропроцессора, блока памяти, устройства ввода — вывода. Блоки объединены тремя шинами: адреса, данных и управления.

Микропроцессор (МП) — устройство, выполняющее обработку информации в соответствии с введенной программой. Он является «мозгом» системы и содержит все необходимые элементы для распознавания и выполнения определенных команд.

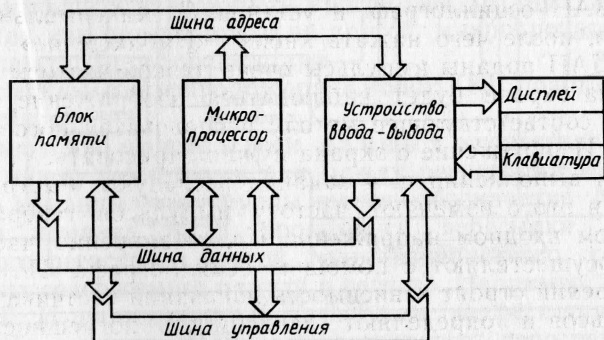


Рис. 11.1. Микропроцессорная система

Блок памяти служит для хранения кодов последовательности команд (программы) и данных, которые используются при обработке информации. Обращение к памяти (запись или чтение) производится в соответствии с управляющими сигналами МП.

Устройство ввода — вывода предназначено для считывания данных с клавиатуры и других устройств ввода, а также для вывода данных на дисплей или другие устройства вывода. Устройство ввода — вывода тоже работает под управлением МП.

Структурная схема микропроцессора КР580ИК80 приведена на рис. 11.2. К микропроцессору подходит 8-разрядная шина данных и 16-разрядная шина адреса. Шина данных связана с шестью 8-разрядными регистрами В, С, D, E, H, L и 16-разрядными указателями стека, аккумулятором (специализированным восьмиразрядным регистром А), временным 8-разрядным регистром и регистром флагов. Из этой шины данные могут передаваться в 8-разрядный регистр кода операции и 16-разрядный программный счетчик.

В шину адреса могут передаваться сигналы адреса из программного счетчика и регистров H, L. H — регистр старших разрядов адреса, L — регистр младших разрядов адреса.

Более подробно работу всех блоков рассмотрим на примере выполнения отдельных команд.

Все данные и команды, циркулирующие по шинам и поступающие из устройств оперативной памяти и ввода — вывода, представлены в двоичной форме. Однако для удобства будем записывать их в шестнадцатеричной форме. Это соответствует

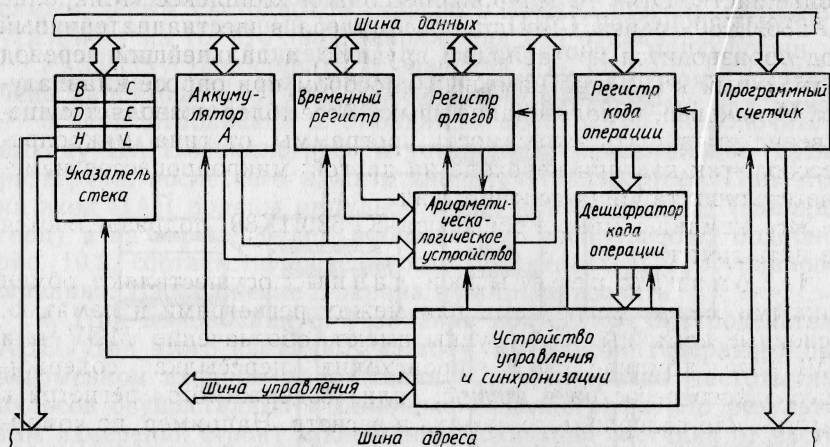


Рис. 11.2. Структурная схема микропроцессора

и клавиатуре ввода. Тогда 8-разрядное двоичное число может быть представлено в виде 2-разрядного шестнадцатеричного числа. Например, двоичное число 11000101 будем записывать как С5. Соответствие между 4-разрядными двоичными и шестнадцатеричными числами показано в табл. 11.1.

Таблица 11.1

Двоичное число	Шестнадцатеричное число	Десятичное число	Двоичное число	Шестнадцатеричное число	Десятичное число
0000	0	0	1000	8	8
0001	1	1	1001	9	9
0010	2	2	1010	A	10
0011	3	3	1011	B	11
0100	4	4	1100	C	12
0101	5	5	1101	D	13
0110	6	6	1110	E	14
0111	7	7	1111	F	15

В соответствии с табл. 11.1 шестнадцатеричное число С5 соответствует десятичному числу $12 \times 16 + 5 = 197$. Но даже в

таким виде команды запомнить очень трудно, поэтому чаще их записывают сокращенными английскими словами. Такая запись составляет язык нижнего уровня — Ассемблер. Перевод из Ассемблера в двоичные коды может производиться вручную (по таблице) или специальным транслятором, который имеется в большинстве ЭВМ. В микропроцессорном комплексе «Микролаб КР580ИК80» перевод команд Ассемблера в шестнадцатеричный код производится по таблицам вручную, а дальнейший перевод в двоичный код — программным способом при опросе клавиатуры. И наконец, использование языка Ассемблер позволяет существенно уменьшить зависимость программы от типа микропроцессора, так как при переходе на другой микропроцессор изменяется лишь таблица соответствия.

Все команды микропроцессора КР580ИК80 подразделяются на пять групп:

1. Команды пересылки данных осуществляют обмен данными между регистрами или между регистрами и памятью. Основные команды этой группы имеют обозначение MOV или MVI. По команде MOV происходит пересылка содержимого одного регистра в другой, или содержимого регистра в память, или содержимого памяти в регистр. Например, по команде MOV B, H происходит передача числа из регистра H в регистр B. По команде MVI осуществляется непосредственная запись числа в аккумулятор, регистр или память. Например, команда MVI B, 35 позволяет непосредственно записать число 35 (в шестнадцатеричном коде) в регистр B.

При записи на Ассемблере аккумулятор обозначается буквой А, оперативное запоминающее устройство — М. Шестнадцатеричные коды некоторых команд пересылки данных приведены в табл. 11.2.

Таблица 11.2

Ассемблер	Шестнадцатеричный код	Ассемблер	Шестнадцатеричный код
MOV A, A	7F	MOV M, A	77
MOV A, B	78	MOV M, B	70
MOV A, C	79	MOV M, C	71
MOV A, D	7A		
MOV B, A	47	MOV A, M	7E
MOV B, B	40	MOV B, M	46
MOV B, C	41	MOV C, M	4E
MOV C, A	4F	MVI A, число	3E+число
MOV C, B	48	MVI B, число	06+число
MOV C, C	49	MVI C, число	0E+число
MOV D, A	57		

Команды пересылки данных регистр — регистр занимают в оперативной памяти одну ячейку (1 байт, одно двухразрядное шестнадцатеричное число). Команды для работы с памятью MOV M, A, MOV A, M и другие являются командами с косвенной адресацией. В оперативной памяти будет выбираться ячейка, адрес которой хранится в регистрах H — старшие разряды и L — младшие разряды.

Так, если в регистре H хранится число 82, а в регистре L — число 16, то по команде MOV A, M в регистр A будет записано число с адресом 8216. Такие команды тоже являются однобайтовыми. Однако для непосредственной адресации ячейки памяти 8216 может быть использована команда LDA 8216, занимающая три последовательных байта памяти, в которых хранятся числа 3A, 16, 82. 3A — код команды, 16 — младшие разряды адреса, 82 — старшие разряды адреса. Аналогична команда STA 8216, по которой содержимое аккумулятора передается в ячейку с адресом 8216. И наконец, команда MVI A 27 позволяет непосредственно записать число 27 в аккумулятор. Эта команда занимает 2 байт памяти, в которых хранятся числа 3E, 27. Однако следует помнить, что число 27 записано в шестнадцатеричной системе. В десятичной системе это будет число $2 \times 16 + 7 = 39$.

Выполнение каждой команды (командный цикл) занимает от одного до пяти машинных циклов длительностью 2 мкс каждый. Машинный цикл требуется всякий раз, когда микропроцессор обращается к памяти, устройствам ввода — вывода (портам).

Если команда занимает несколько байтов, то для выбора каждого байта требуется по одному машинному циклу. Так, MOV C, A занимает один машинный цикл и выполняется в такой последовательности. Пусть эта команда записана в ячейке памяти 8200, тогда в этой ячейке будет храниться код 4F. Выполнение команды начинается, если к началу командного цикла на программном счетчике имеется число 8200. Содержимое программного счетчика по ширине адреса передаст адрес 8200 в блок памяти, а по шине управления передается сигнал чтения.

Содержимое ячейки с адресом 8200 (4F) передается по шине данных в регистр кода операции, после чего производится дешифрация кода операции и выполняется операция с шестнадцатеричным кодом 4F. По этой команде содержимое аккумулятора передается на шину данных и с нее в регистр C. На этом выполнение команды заканчивается и к содержимому командного счетчика прибавляется единица.

Выполнение команды LDA 8216, занимающей три ячейки памяти, например 8201, 8202, 8203, в которых хранятся коды 4F, 16, 82, начинается, когда на программном счетчике имеется число 8201. По адресу 8201 выбирается команда 4F. Во втором машинном цикле из следующей ячейки 8202 выбирается число 16

и записывается в регистр L. В третьем машинном цикле из ячейки 8203 выбирается число 82 и записывается в регистр H. В четвертом машинном цикле содержимое регистров H, L передается в шину адреса и формируется сигнал чтения. Число из ячейки 8216 в четвертом машинном цикле передается в аккумулятор. На программном счетчике устанавливается число 8204.

Остальные команды выполняются аналогично.

2. Команды арифметические предназначены для выполнения сложения, вычитания, увеличения или уменьшения содержимого регистров или ячеек памяти на единицу.

Команды сложения и вычитания всегда выполняются между первым числом, находящимся в аккумуляторе, и вторым числом, находящимся в регистре или в памяти. Результат помещается в аккумулятор. Команды ADD R (где R— любой регистр) складывают содержимое аккумулятора и регистра, команды SUB R вычитают из содержимого аккумулятора содержимое регистра, команды INR R увеличивают содержимое регистра на единицу, команды DCR R уменьшают содержимое регистра на единицу. Все эти команды допускают косвенную адресацию, как и команды пересылки.

Шестнадцатеричные коды некоторых арифметических команд приведены в табл. 11.3.

Таблица 11.3

Ассемблер	Шестнадцатеричный код	Ассемблер	Шестнадцатеричный код
ADD A	87	INR A	3C
ADD B	80	INR B	04
ADD C	81	INR C	0C
ADD M	86	INR M	34
SUB A	97	DCR A	3D
SUB B	90	DCR B	05
SUB C	91	DCR C	0D
SUB M	96	DCR M	35

При выполнении всех указанных команд, если результат равен нулю, триггер флага нуля (флаг Z) устанавливается в состояние «1», если результат не равен нулю — в состояние «0». При выполнении операции ADD R и INR R, если происходит переполнение, устанавливается флаг переноса (флаг C), при вычитании, если содержимое аккумулятора меньше содержимого регистра, — флаг S. Использование флагов происходит обычно при выполнении операций условного перехода.

3. Логические команды выполняют логические операции над данными, хранящимися в регистрах и ячейках памяти. Основными логическими операциями являются И, ИЛИ, исключаящие ИЛИ, сравнение. Операция сравнения CMP R произво-

дит сравнение содержимого аккумулятора с содержимым регистра, ячейки памяти (косвенная адресация) и непосредственно с числом. Некоторые команды сравнения приведены в табл. 11.4.

Таблица 11.4

Ассемблер	Шестнадцатеричный код	Примечание
CMP A	BF	При равенстве сравниваемых чисел устанавливается флаг Z
CMP B	B8	
CMP C	B9	
CMP M	BE	
CPI, число	FE+число	

4. Команды перехода изменяют нормальную последовательность исполнения команд. Команда безусловного перехода JMP, «адрес» всегда устанавливает в программный счетчик число, записанное в позиции «адрес». Следующей выполняется команда, адрес которой в блоке памяти соответствует числу в позиции «адрес». Команда условного перехода передает управление команде, указанной в позиции «адрес», только при единичном значении флага Z. Последовательность команд не изменяется, если флаг Z равен нулю. К этой же группе команд относятся команды вызова подпрограммы CALL, «адрес». По этой команде управление передается по содержимому ячейки «адрес», адрес последней выполненной перед ней команды запоминается в стеке и после выполнения подпрограммы по команде RET происходит возврат к выполнению основной программы, следующей за командой CALL.

Некоторые команды перехода и их шестнадцатеричные коды приведены в табл. 11.5.

Таблица 11.5

Ассемблер	Шестнадцатеричный код	Условие перехода по «адресу»
JMP, «адрес»	C3+адрес	Нет
JNZ, «адрес»	C2+адрес	Z=0
JZ, «адрес»	CA+адрес	Z=1
CALL, «адрес»	CD+адрес	Нет
RET	C9	»

5. Команды ввода — вывода служат для организации ввода и вывода информации и будут рассмотрены на конкретном примере.

Микропроцессор КР580ИК80 является одним из самых простых среди семейства современных микропроцессоров. Значи-

тельно более современным является 16-разрядный микропроцессор КР1810ВМ86. В нем сохранено большинство команд микропроцессора КР580ИК80 и добавлены команды, выполняющие арифметические и логические операции над 16-, 32- и 64-разрядными числами. 16-разрядное арифметическо-логическое устройство реализует операции умножения и деления с фиксированной запятой. Существенно выше и быстродействие микропроцессора. Время выполнения одной команды с двумя 16-разрядными числами составляет 0,8 мкс. Кристалл микропроцессора КР1810ВМ86 содержит 29 000 транзисторов.

Дальнейшая интеграция микропроцессоров привела к появлению больших интегральных схем, в которых наряду с микропроцессором находятся оперативное и постоянное запоминающие устройства и интерфейсные схемы для связи с внешними устройствами, т. е. они содержат все атрибуты микроЭВМ. Такой однокристалльной микроЭВМ является микроконтроллер КМ1816ВЕ48. В его состав входит 8-разрядный микропроцессор, постоянное запоминающее устройство емкостью 1 К байт, оперативное запоминающее устройство на 64 8-разрядных регистрах и программно-управляемые схемы ввода — вывода. Время выполнения одной операции с двумя 8-разрядными числами составляет 2,5 мкс.

Описание лабораторной панели

В качестве лабораторной установки используется микропроцессорная система «Микролаб КР580ИК80», предназначенная для изучения элементов аппаратного и программного обеспечения систем, построенных на базе микропроцессора КР580ИК80. Установка содержит панель, на которой размещены все микросхемы, клавиатура, восьмисегментные индикаторы, светодиоды и тумблеры, источники питания. Общий вид лабораторной панели показан на рис. 11.3. Карта памяти приведена в табл. 11.6.

Клавиатура лабораторной установки содержит 16 клавиш шестнадцатеричной системы (от 0 до F), а также клавиши «Пуск», «Возвр.», «Уст. А, Д», «АД—», «АД+», «ЗП», «Вывод», «Ввод» и отдельную клавишу «Сброс» (рис. 11.4).

Все клавиши опрашиваются и дешифруются программой монитора, только клавиша «Сброс» работает асинхронно и, прекращая выполнение любой программы, устанавливает в программный счетчик нулевой адрес.

При наборе любых цифр на клавиатуре программа монитора высвечивает их на четырех правых индикаторах, на четырех левых индикаторах высвечивается содержимое программного счетчика. При нажатии клавиши «ЗП» число, обозначенное на двух правых индикаторах, записывается в ячейку памяти, номер которой отмечен на четырех левых индикаторах. При нажатии на клавишу «Уст.АД» четыре цифры, высвеченные на правых



Рис. 11.3. Общий вид микропроцессорной системы «Микролаб КР580ИК80»

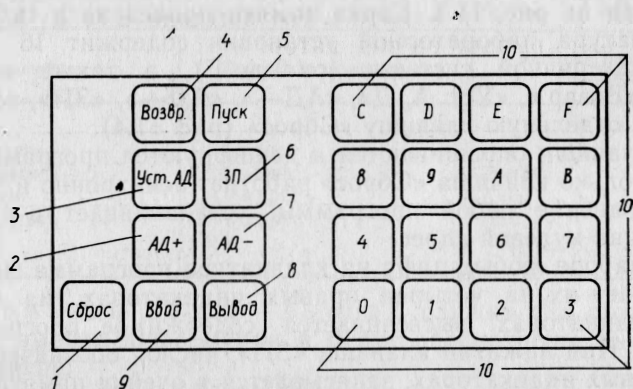


Рис. 11.4. Клавиатура «Микролаб КР580ИК80»

Таблица 11.6

Адреса								в шестнадцатеричном коде	Емкость памяти	ПЗУ/ОЗУ	Использование
в двоичном коде по разрядам											
15	14	13	12	11	10	9	8				
1	1	1	1	1	1	1	1	FFFF 1 8400	31К байт		Неиспользуемая область
1	0	0	0	0	1	0	0				
1	0	0	0	0	0	0	1	83FF 1 8000	1К байт	ОЗУ	Рабочая область монитора Область пользователя
1	0	0	0	0	0	0	0				
0	1	1	1	1	1	1	1	7FFF 1 0400	31К байт		Неиспользуемая область
0	0	0	0	0	1	0	0				
0	0	0	0	0	0	1	1	03FF 1 0300	256 байт	ППЗУ	Дополнительная область монитора
0	0	0	0	0	0	1	1				
0	0	0	0	0	0	0	1	02FF 1 0000	768 байт	ППЗУ	Область монитора
0	0	0	0	0	0	0	0				

индикаторах, переносятся к программный счетчик. Клавиши «АД—» и «АД+» позволяют последовательно просматривать ячейки памяти, содержимое которых высвечивается на двух правых индикаторах. При этом содержимое регистров заносится в определенные ячейки памяти в соответствии с табл. 11.7 и из них может быть выдано на индикатор.

Таблица 11.7

Адрес	Регистр	Адрес	Регистр
83ЕВ	Аккумулятор	83ЕЗ	Указатель стека (старший байт)
83ЕА	Регистр признаков	83Е2	Указатель стека (младший байт)
83Е9	Регистр В	83Е1	Программный счетчик (старший байт)
83Е8	Регистр С	83Е0	Программный счетчик (младший байт)
83Е7	Регистр D		
83Е6	Регистр E		
83Е5	Регистр H		
83Е4	Регистр L		

Просмотр записанной программы удобно производить в пошаговом режиме. Для этого служит переключатель «Авт.—Шаг» в положении «Шаг». В этом режиме при нажатии на клавишу «Пуск» выполняется только одна очередная команда, на индикаторах (в четырех правых слева направо) отображается содержимое аккумулятора и регистра признаков.

Обслуживающая программа — программа-монитор — находится в постоянном запоминающем устройстве в ячейках в соответствии с табл. 11.6. Установка «Микролаб» все время выполняет программу монитора, кроме тех случаев, когда она выполняет программу пользователя (после нажатия кнопки «Пуск»). Возвращение к программе монитора осуществляется после нажатия кнопки «Сброс».

Основные подпрограммы программы монитора приведены в табл. 11.8.

Таблица 11.8

Наименование подпрограммы	Функции программы	Адрес начала подпрограммы	Адрес конца подпрограммы	Примечание
START	Управляющая программа монитор	0055	0093	Высвечиваются восемь чисел, находящихся в ячейках 83F4—83F7
ADSET	Установка адреса	0094	009C	
ADINX	Выполнение команды «АД+»	009D	00B7	
ADDCX	Выполнение команды «АД-»	00B8	00C1	
MEM W	Запись в память	00C2	00CB	
BRENT	Прерывание и одношаговая работа	0151	01AO	
SEGCG	Высвечивание дисплея	01CO	01E8	
KEYIN	Ввод с клавиатуры	0216	0278	

Все подпрограммы могут быть вызваны программой пользователя, например командой CALL KEYIN на Ассемблере. В шестнадцатеричном коде это выглядит как CD 16 02. Такая команда занимает три последовательные ячейки: CD — код команды, 16 — младшие разряды начального адреса подпрограммы, 02 — старшие разряды адреса.

С клавиатуры подпрограмма может быть вызвана передачей управления по адресу начала подпрограммы с помощью клавиши «Уст.АД».

А. Выполняется при подготовке к работе.

1. Перевести число X из десятичной формы в шестнадцатеричную, написать на языке Ассемблер несколько вариантов программы засылки этого числа в аккумулятор и регистры В, С, перевести эту программу в шестнадцатеричные коды и разместить с начального адреса 8010 [число $X=8$ ·номер по журналу + номер группы].

2. Добавить к составленной программе:

число из аккумулятора поместить в ячейку 8200;

содержимое регистров В и С сложить и поместить результат в ячейку 8201;

из содержимого регистра В вычесть содержимое регистра С и поместить результат в ячейку 8203.

Записать программу на языке Ассемблер и в шестнадцатеричных кодах.

3. Добавить к разработанной программе вызов подпрограммы высвечивания индикатора — SEGCG и организовать циклическое выполнение указанной программы.

Б. Выполняется в лаборатории.

1. Включить «Микролаб КР580ИК80» и проверить его работоспособность.

2. Просмотреть и записать содержимое ячеек с 0300 по 0320, в которых записана музыкальная программа.

3. Ввести программу, разработанную в п. А1, и проверить ее выполнение в шаговом режиме. Проверить содержимое аккумулятора и регистров В, С после каждой операции, составить таблицу выполнения.

4. Добавить программу, составленную в п. А2, и проверить ее работоспособность, составить таблицу выполнения.

5. Ввести программу, разработанную в п. А3, и проверить ее работоспособность в автоматическом режиме. Убедиться, что при выполнении программы не опрашивается клавиатура, кроме клавиши «Сброс», которая действует асинхронно.

6*. Ввести программу счетчика и проверить ее работоспособность в автоматическом режиме.

7*. Ввести программу ввода информации с переключателей входного порта и отобразить ее на выходном индикаторе. Проверить работоспособность программы в автоматическом режиме.

8. Рассчитать время выполнения каждой программы.

Методические указания по выполнению лабораторной работы

1. Для засылки числа в аккумулятор и регистры могут использоваться команды MVI или комбинация команд MVI, MOV.

2. Для записи числа из аккумулятора в ячейку памяти надо воспользоваться командой STA, для сложения и вычитания — командами ADD, SUB.

3. Вызов программы высвечивания индикатора осуществляют командой CALL SEGCG (в шестнадцатеричных кодах CD CO 01), а циклическое выполнение — командой безусловного перехода JMP в начало программы.

Записывают все программы в виде табл. 11.9 (таблица соответствует $X=7$).

Таблица 11.9

Адрес	Код	Метка	Команда	Комментарии
8010	3E	START	MVI A, 7	Засылка числа 7 в аккумулятор
8011	07			
8012	06		MVI B, 7	Засылка числа 7 в регистр В
8013	07			
8014	48		MOV C, B	Пересылка числа 7 из регистра В в регистр С
.
.
.
..	C3	.	JMP START	Переход к началу программы:
.	10			младший байт адреса
..	80			старший байт адреса

4. Проверку работоспособности установки «Микролаб» следует производить в такой последовательности:

включают установку, тумблер режима переводят в положение «Авт.»;

нажимают кнопку «Сброс» — в программном счетчике устанавливается адрес 0000, на индикаторе загораются все нули;

набирают число 300 — на правых индикаторах загорается число 0300;

нажатием на кнопку «Уст.АД» устанавливают число 0300 в программный счетчик;

начинают выполнение программы с адреса 0300, нажав кнопку «Пуск».

При исправной установке «Микролаб» из динамика будет слышна мелодия, записанная в ПЗУ.

5. Для просмотра содержимого ячеек памяти необходимо:

установить номер первой ячейки в программный счетчик — на четырех левых индикаторах высветится адрес ячейки, а на двух крайних правых индикаторах — содержимое ячейки;

нажать на клавишу «АД+» — увеличится содержимое программного счетчика на единицу и содержимое следующей ячейки высветится на двух правых индикаторах. Клавиши «АД-» позволяют уменьшить содержимое программного счетчика.

Записать содержимое ячеек в виде таблицы, отметить известные команды.

6. Для записи информации в устройство оперативной памяти необходимо:

установить номер первой ячейки в программный счетчик;

установить записываемое число в двух крайних правых индикаторах и записать его по указанному адресу, нажав на кнопку «ЗП». На индикаторе адреса высветится адрес следующей ячейки и на крайних правых индикаторах ее содержимое, а записанное число сместится на две ячейки левее.

Проверку записанной информации можно осуществить по методике, описанной в п. 5.

7. Для выполнения программы в шаговом режиме переключатель режима должен быть поставлен в положение «Шаг». При нажатии клавиши «Пуск» будет выполнена только одна команда, а дисплей покажет адрес следующей команды. После выполнения каждой команды можно просматривать содержимое любых ячеек памяти по методике, описанной в п. 5, и содержимое регистров в соответствии с табл. 11.7. Возвращение к выполнению программы производится при нажатии клавиши «Возвр».

По результатам просмотра в шаговом режиме составить таблицу выполнения (табл. 11.10).

Таблица 11.10

Метка	Наименование выполненной команды (Ассемблер)	Содержимое					
		регистров			ячеек памяти		
		А	В	С	8200	8201	8202

8. Программа счетчика приведена в табл. 11.11. До ввода ее в память следует заполнить графу адресов и добавить недостающие шестнадцатеричные коды.

При правильной работе программы число в самом правом индикаторе будет изменяться на единицу приблизительно каждые 0,7 с.

9. Программа ввода информации с трех тумблеров и высвечивания ее на индикаторе приведена в табл. 11.12.

Адрес	Код	Метка	Команда	Комментарии
.	.		MVI A, 0	Засылка 0 в аккумулятор, регистры В, С
.	00		MOV B, A	
.	.		MOV C, A	Засылка адреса 83F7 в регистры H, L
.	2E		MVI L, F7	
.	F7		MVI, H83	
.	26		MOV M, A	
.	83			Засылка 0 в ячейку 83F7
.	77		DCX B	
.	OB	CONT:		Уменьшение на единицу общего числа, находящегося в регистрах В и С
.	.		MOV A, B	Засылка числа из регистра В в аккумулятор
.	B1		ORA C	
.	.			Логическое сложение данных регистра С и аккумулятора. Если результат 0, то флаг Z=1
.	C2		JNZ CONT	Переход к метке CONT при Z=0
.	.			Увеличение на единицу содержимого ячейки 83F7
.	34		INR M	
.	CD		CALL SEGCG	Вызов подпрограммы высвечивания индикатора
.	CO			
.	01			Переход к метке CONT
.	C3		JMP CONT	
.	.			
.	.			

В установке «Микролаб» порт ввода — вывода реализован на программируемом периферийном интерфейсе (микросхема КР580ИК55). К трем разрядам порта С подключены тумблеры. Этот порт программируется как порт ввода. К восьми разрядам порта В подключены светодиоды. Этот порт программируется как порт вывода. Чтобы запрограммировать интерфейс, как было описано, необходимо подать на него число 81 из аккумулятора по адресу FB, что выполняется двумя первыми командами в табл. 11.12.

При правильной работе программы светодиоды 2, 3, 4, считая справа, показывают данные, которые установлены на тумблерах порта ввода. Эти же данные в шестнадцатеричном коде отображаются на крайнем восьмисегментном индикаторе.

Адрес	Код	Метка	Команда	Комментарии
.	81		MVI A, 81	Запись в аккумулятор данных для программирования интерфейса
.	D3		OUT FB	Программирование интерфейса
.	FB			
.	2E		MVI L, F7	
.	F7			Засылка адреса 83F7 в регистры H, L
.	26		MVI, H, 83	
.	83			
.	DB	RID	IN FA	Чтение данных из порта ввода
.	FA			
.	D3		OUT F9	Запись данных в порт вывода
.	F9			Засылка данных в ячейку 83F7
.	77		MOV M, A MVI A, 8F	Перепрограммирование интерфейса
.	3E			
.	8F		OUT FA	
.	D3			
.	FA			
.	CD			
.	CO		CALL SEGCG	Вызов подпрограммы высвечивания индикатора
.	01			
.	C3		JMP RID	Переход к метке RID

Контрольные вопросы

1. Как перевести десятичное число 253 в двоичное и шестнадцатеричное?
2. Как работает команда MOV B, C?
3. Как работает команда MVIN, 33?
4. Как работает команда MOV A, M?
5. Сколько машинных тактов занимает команда ADD M?
6. Какие сигналы могут передаваться в шину адреса?
7. Какие сигналы могут передаваться в шину данных?
8. Какие команды называются арифметическими?
9. Зачем нужен программный счетчик?
10. Что такое флаг нуля?
11. Что такое флаг переноса?
12. Какие команды называются логическими?
13. Как работают команды перехода; JMP — безусловного, JNZ — условного?
14. Как работает команда CALL?
15. Для чего служит клавиша «Уст. АД»?
16. Как работают клавиши «АД+» и «АД-»?
17. Для каких целей используется подпрограмма SEGCG?

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ОПИСАНИЕ УНИВЕРСАЛЬНОГО ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

положены два цифровых вольтметра (например, Ф200) и два узкопрофильных амперметра (типа М-1830Аэ) 6, 7. Под ними слева установлен генератор стандартных сигналов ГЗ-36А 3, а справа — осциллограф С1-68 9, между которыми помещается испытательная панель лабораторной установки 4. Для выполнения некоторых лабораторных работ применяется переносной универсальный вольтметр В7-15 2.

Вся измерительная аппаратура и испытательная панель стенда являются съемными, что позволяет легко заменять приборы в случае выхода их из строя, а испытательную панель — при переходе от одной лабораторной работы к другой.

Рис. П.1. Схема универсального лабораторного стенда

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 12 В применяется выпрямитель УБП-2, изготовленный опытным заводом МЭИ. Блок питания помещен внутри левой тумбы стола 1 (рис. П.1).

Питание к съемной аппаратуре подводится через ножевые разъемы РП14-16Л при вставлении их в соответствующие пазы стенда до упора. На переднем щите рядом с каждым измерительным прибором (амперметром и вольтметром) располагаются переключатели рода работ и пределов измерений.

Исследуемые устройства и приборы располагаются на съемной испытательной панели 4. Каждая испытательная панель устанавливается и закрепляется на стенде ножевыми разъемами РП14-16Л. К ответным частям этих

разъемов подведены питающие напряжения. Входные (подводящие) выводы амперметров и вольтметров, установленных на стенде, через те же разъемы РП14-16Л выводятся на испытательную панель. Входные выводы генератора ГЗ-36А, входные выводы осциллографа С1-68 и гнезда измерительных приборов подсоединяются к испытательной панели «напрямую» специальными соединительными проводами со штырями и кабелем.

Включение блоков питания и измерительных приборов производится тумблерами с общего щитка управления 10 в такой последовательности:

включается общее питание стенда, при этом подается напряжение сети на блоки питания, цифровые вольтметры, осциллограф С1-68, генератор ГЗ-36А и подсветку узкопрофильных амперметров;

включаются тумблеры, подключающие к испытательной панели питающие напряжения, при необходимости подается постоянное регулируемое напряжение (U_-) и переменные напряжения: 6,3; 15; 115 и 220 В.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2. НАБОР КОМАНД

МИКРОПРОЦЕССОРА КР580ИК80

Все команды микропроцессора КР580ИК80 делятся на пять групп:

1) команды пересылки данных. Осуществляют пересылку данных между регистрами или между памятью и регистрами;

2) арифметические команды. Предназначены для выполнения сложения, вычитания, увеличения или уменьшения содержимого регистров или ячеек памяти;

3) логические команды. Выполняют логические операции И, ИЛИ, исключающее ИЛИ, сравнения, сдвига и дополнения данных в регистрах и ячейках памяти;

4) команды переходов (условных и безусловных), вызова подпрограмм и возвращения из подпрограмм;

5) команды ввода — вывода, управления и работы со СТЕКом. Предназначены для выполнения операций ввода — вывода, работы со СТЕКом, управления флагами, разрешения и запрещения прерываний.

Символы и сокращения

Аккумулятор	А — регистр
Адр.	16-битовый адрес
Байт	8-битовое слово данных
2 байт	16-битовое слово данных
Байт 2	Второй байт команды
Байт 3	Третий байт команды
Порт	8-битовый адрес устройства ввода — вывода
г, г1, г2	Один из регистров А, В, С, D, Е, H, L
DDD, SSS	Набор битов, означающий один из регистров А, В, С, D, Е, H, L (DDD — регистр назначения, SSS — регистр источника)
SP	16-битовый регистр указателя СТЕКа

Команды пересылки

Команды этой группы осуществляют пересылку данных в/из регистр(а) и ячейки памяти и не изменяют состояния флагов. MOV г1, г2 (ПЕРЕСЫЛКА ДАННЫХ ИЗ РЕГИСТРА В РЕГИСТР) (г1)←(г2).

Содержимое регистра г2 пересылается в регистр г1.

0	1	D	D	D	S	S	S
---	---	---	---	---	---	---	---

MOV	A,A	7F	MOV	B,A	47
MOV	A,B	78	MOV	B,B	40
MOV	A,C	79	MOV	B,C	41
MOV	A,D	7A	MOV	B,D	42
MOV	A,E	7B	MOV	B,E	43
MOV	A,H	7C	MOV	B,H	44
MOV	A,L	7D	MOV	B,L	45
MOV	C,A	4F	MOV	D,A	57
MOV	C,B	48	MOV	D,B	50
MOV	C,C	49	MOV	D,C	51
MOV	C,D	4A	MOV	D,D	52
MOV	C,E	4B	MOV	D,E	53
MOV	C,H	4C	MOV	D,H	54
MOV	C,L	4D	MOV	D,L	55
MOV	E,A	5F	MOV	H,A	67
MOV	E,B	58	MOV	H,B	60
MOV	E,C	59	MOV	H,C	61
MOV	E,D	5A	MOV	H,D	62
MOV	E,E	5B	MOV	H,E	63
MOV	E,H	5C	MOV	H,H	64
MOV	E,L	5D	MOV	H,L	65
MOV	L,A	6F			
MOV	L,B	68			
MOV	L,C	69			
MOV	L,D	6A			
MOV	L,E	6B			
MOV	L,H	6C			
MOV	L,L	6D			

Циклы: 1

Состояния: 4.

Адресация: регистровая.

Флаги: не используются.

MOV, M (ПЕРЕСЫЛКА ДАННЫХ ИЗ ПАМЯТИ)

(r) ← ((H) (L))

Содержимое ячейки памяти, адрес которой хранится в регистрах H, L, пересылается в регистр r.

0	1	D	D	D	1	1	0
---	---	---	---	---	---	---	---

MOV	A,M	7E
MOV	B,M	46
MOV	C,M	4E
MOV	D,M	56
MOV	E,M	5E
MOV	H,M	66
MOV	L,M	6E

Циклы: 2.

Состояния; 7.

Адресация: косвенная регистровая.

Флаги не используются.

MOV M, r (ПЕРЕСЫЛКА ДАННЫХ В ПАМЯТЬ)

((H)(L)) ← (r)

Содержимое регистра пересылается в ячейку памяти, адрес которой содержится в регистрах H, L.

0	1	1	1	0		S	S
---	---	---	---	---	--	---	---

MOV M,A 77

MOV M,B 70

MOV M,C 71

MOV M,D 72

MOV M,E 73

MOV M,H 74

MOV M,L 75

Циклы: 2.

Состояния: 7.

Адресация: косвенная регистровая.

Флаги: не используются.

MVI, r байт (НЕПОСРЕДСТВЕННАЯ ПЕРЕСЫЛКА)

(r) ← (байт 2)

Содержимое второго байта команды пересылается в регистр.

0	0	D	D	D	1	1	0
Данные							

MVI A, байт 3E

MVI B, байт 06

MVI C, байт 0E

MVI D, байт 16

MVI E, байт 1E

MVI H, байт 26

MVI L, байт 2E

Циклы: 2.

Состояния: 7.

Адресация: непосредственная.

Флаги: используются.

MVI M, байт (НЕПОСРЕДСТВЕННАЯ ПЕРЕСЫЛКА В ПАМЯТЬ)

((H)(L)) ← (байт 2)

Содержимое второго байта команды пересылается в ячейку памяти, адрес которой указан в регистрах H, L.

0	0	1	1	0	1	1	0
Данные							

MVI M, байт 36

Циклы: 3.

Состояния: 10.

Адресация: косвенная регистровая.

Флаги: не используются.

LXI rp, 2 байт (НЕПОСРЕДСТВЕННАЯ ЗАГРУЗКА ПАРЫ РЕГИСТРОВ)

(r1) (байт 3)

(r2) (байт 2)

Третий байт команды пересылается в старший регистр (r1) пары регистров, второй — в младший регистр (r2) пары регистров.

0	0	R	P	0	0	0	1
Младший байт данных							
Старший байт данных							

LXI B, 2 байт 01 (непосредственная загрузка пары регистров B, C)

LXI D, 2 байт 11 (непосредственная загрузка пары регистров D, E)

LXI H, 2 байт 21 (непосредственная загрузка пары регистров H, L)

LXI SP, 2 байт 31 (непосредственная загрузка указателя СТЕКА)

Циклы: 3.

Состояния: 10.

Адресация: непосредственная.

Флаги: не используются.

LDA [адр.] (ПРЯМАЯ ЗАГРУЗКА АККУМУЛЯТОРА)

(A) ← ((байт 3) (байт 2))

Содержимое ячейки памяти, адрес которой указан во втором и третьем байтах команды, загружается в аккумулятор.

0	0	1	1	1	0	1	0
Младший байт адреса							
Старший байт адреса							

LDA [адр.] 3A

Циклы: 4.

Состояния: 13.

Адресация: прямая.

Флаги: не используются.

STA [адр.] (ПРЯМАЯ ЗАПИСЬ СОДЕРЖИМОГО АККУМУЛЯТОРА В ПАМЯТЬ)

((байт 3) (байт 2)) ← (A)

Содержимое аккумулятора пересылается в ячейку памяти, адрес которой указан во втором и третьем байтах команды.

0	0	1	1	0	0	1	0
Младший байт адреса							
Старший байт адреса							

STA [адр.] 32

Циклы: 4.

Состояния: 13.

Адресация: прямая.

Флаги: не используются.

LHLD [адр.] (ПРЯМАЯ ЗАГРУЗКА РЕГИСТРОВ H и L)

(L) ← ((байт3) (байт 2))

(H) ← ((байт 3) (байт 2) + 1)

Содержимое ячейки памяти, адрес которой указан во втором и третьем байтах команды, пересылается в регистр L. Содержимое ячейки памяти со следующим адресом (([адр.] + 1) пересылается в регистр H.

0	0	1	0	1	0	1	0
Младший байт адреса							
Старший байт адреса							

LHLD [адр.] 2A

Циклы: 5.

Состояния: 16.

Адресация: прямая.

Флаги: не используются.

LDAX гр (КОСВЕННАЯ ЗАГРУЗКА АККУМУЛЯТОРА)

(A) ← ((гр))

Содержимое ячейки памяти, адрес которой указан в паре регистров гр, пересылается в регистр A.

Примечание. Могут быть указаны пары регистров гр=В (регистры В, С) или гр=D (регистры D, E).

0	0	R	P	1	0	1	0
---	---	---	---	---	---	---	---

LDAX, В 0A

LDAX, D 1A

Циклы: 2.

Состояния: 7.

Адресация: косвенная регистровая.

Флаги: не используются.

STAX гр (КОСВЕННАЯ ЗАПИСЬ СОДЕРЖИМОГО АККУМУЛЯТОРА В ПАМЯТЬ)

((гр))←(A)

Содержимое аккумулятора пересылается в ячейку памяти, адрес которой определен в паре регистров гр.

Примечание. Могут быть указаны только пары регистров гр-В (регистры В, С) или гр-D (регистры D, E).

0	0	R	P	0	0	1	0
---	---	---	---	---	---	---	---

STAX В 02

STAX D 12

Циклы: 2.

Состояния: 7.

Адресация: косвенная регистровая.

Флаги: не используются.

XCHG (ОБМЕН ДАННЫМИ МЕЖДУ РЕГИСТРАМИ H, L и D, E)

(H) ↔ (D)

(L) ↔ (E)

Содержимое регистров H, L обменивается с содержимым регистров D, E.

1	1	1	0	1	0	1	1
---	---	---	---	---	---	---	---

XCHG EB

Циклы: 1.

Состояния: 4.

Адресация: регистровая.

Флаги: не используются.

Арифметические команды

Команды этой группы выполняют арифметические операции над данными в регистрах и ячейках памяти и флагами.

Если нет особых указаний, то команды изменяют состояния флагов нуля, четности, переноса и вспомогательного переноса в соответствии со стандартными правилами.

Все операции вычитания выполняются через арифметическое дополнение до двух, причем флаг переноса устанавливается в состояние логической «1», если имеется заем, и сбрасывается, если займа не было.

ADD r (СЛОЖЕНИЕ СОДЕРЖИМОГО АККУМУЛЯТОРА С СОДЕРЖИМЫМ РЕГИСТРА)

$(A) \leftarrow (A) + (r)$

Содержимое регистра r складывается с содержимым аккумулятора. Результат помещается в аккумулятор.

1	0	0	0	0	S	S	S
---	---	---	---	---	---	---	---

ADD A 87

ADD B 80

ADD C 81

ADD D 82

ADD E 83

ADD H 84

ADD L 85

Циклы: 1.

Состояния: 4.

Адресация: регистровая.

Флаги: Z, S, P, CY, AC.

ADD M (СЛОЖЕНИЕ СОДЕРЖИМОГО АККУМУЛЯТОРА С СОДЕРЖИМЫМ ЯЧЕЙКИ ПАМЯТИ)

$(A) \leftarrow (A) + ((H)(L))$

Содержимое ячейки памяти, адрес которой содержится в регистрах H, L, складывается с содержимым аккумулятора. Результат помещается в аккумулятор.

1	0	0	0	0	1	1	0
---	---	---	---	---	---	---	---

ADD M 86

Циклы: 2.

Состояния: 7.

Адресация: косвенная регистровая.

Флаги: Z, S, P, CY, AC.

ADI байт (НЕПОСРЕДСТВЕННОЕ СЛОЖЕНИЕ)

$(A) \leftarrow (A) + (\text{байт } 2)$

Содержимое второго байта команды складывается с содержимым аккумулятора. Результат помещается в аккумулятор.

1	1	0	0	0	1	1	0
Данные							

ADI байт C6

Циклы: 2.

Состояния: 7.

Адресация: непосредственная.

Флаги: Z, S, P, CY, AC.

ADC r (СЛОЖЕНИЕ СОДЕРЖИМОГО АККУМУЛЯТОРА С СОДЕРЖИМЫМ РЕГИСТРА И БИТОМ ФЛАГА ПЕРЕНОСА)

$(A) \leftarrow (A) + (r) + (CY)$

Содержимое регистра r и бит флага переноса складываются с содержимым аккумулятора. Результат помещается в аккумулятор.

1	0	0	0	1	S	S	S
---	---	---	---	---	---	---	---

ADC A 8F

ADC B 88

ADC C 89

ADC D 8A

ADC E 8B

ADC H 8C

ADC L 8D

Циклы: 1.

Состояния: 4.

Адресация: регистровая.

Флаги: Z, S, P, CY, AC.

ADC M (СЛОЖЕНИЕ СОДЕРЖИМОГО АККУМУЛЯТОРА С СОДЕРЖИМЫМ ЯЧЕЙКИ ПАМЯТИ И БИТОМ ФЛАГА ПЕРЕНОСА)

$(A) \leftarrow (A) + ((H)(L)) + (CY)$

Содержимое ячейки памяти, адрес которой указан в регистрах H, L, и содержимое бита флага переноса складываются с содержимым аккумулятора. Результат помещается в аккумулятор.

1	0	0	0	1	1	1	0
---	---	---	---	---	---	---	---

ADC M 8E

Циклы: 2.

Состояния: 7.

Адресация: косвенная регистровая.

Флаги: Z, S, P, CY, AC.

АСИ байт (НЕПОСРЕДСТВЕННОЕ СЛОЖЕНИЕ С БИТОМ ФЛАГА ПЕРЕНОСА)

$$(A) \leftarrow (A) + (\text{байт } 2) + (CY)$$

Содержимое второго байта команды и бита флага переноса складывается с содержимым аккумулятора. Результат помещается в аккумулятор.

1	1	0	0	1	1	1	0
Данные							

АСИ байт СЕ

Циклы: 2.

Состояния: 7.

Адресация: непосредственная.

Флаги: Z, S, P, CY, AC.

SUB (ВЫЧИТАНИЕ СОДЕРЖИМОГО РЕГИСТРА)

$$(A) \leftarrow (A) - (r)$$

Содержимое регистра r вычитается из содержимого аккумулятора. Результат помещается в аккумулятор.

1	0	0	1	0	S	S	S
---	---	---	---	---	---	---	---

SUB A 97

SUB B 90

SUB C 91

SUB D 92

SUB E 93

SUB H 94

SUB L 95

Циклы: 1.

Состояния: 4.

Адресация: регистровая.

Флаги: Z, S, P, CY, AC.

SUB M (ВЫЧИТАНИЕ СОДЕРЖИМОГО ЯЧЕЙКИ ПАМЯТИ)

$$(A) \leftarrow (A) - ((H)(L))$$

Содержимое ячейки памяти, адрес которой содержится в регистрах H, L, вычитается из содержимого аккумулятора. Результат помещается в аккумулятор.

1	0	0	1	0	1	1	0
---	---	---	---	---	---	---	---

SUB M 96

Циклы: 2.

Состояния: 7.

Адресация: косвенная регистровая.

Флаги: Z, S, P, CY, AC.

SUI байт (НЕПОСРЕДСТВЕННОЕ ВЫЧИТАНИЕ)

(A) ← (A) — (байт 2)

Содержимое второго байта команды вычитается из содержимого аккумулятора. Результат помещается в аккумулятор.

1	1	0	1	0	1	1	0
Данные							

SUI байт D6

Циклы: 2.

Состояния: 7.

Адресация: непосредственная.

Флаги: Z, S, P, CY, AC.

SBB r (ВЫЧИТАНИЕ СОДЕРЖИМОГО РЕГИСТРА И БИТА ФЛАГА ПЕРЕНОСА)

(A) ← (A) — (r) — (CY)

Содержимое регистра r и бит флага переноса CY вычитаются из содержимого аккумулятора. Результат помещается в аккумулятор.

1	0	0	1	1	S	S	S
---	---	---	---	---	---	---	---

SBB A 9F

SBB B 98

SBB C 99

SBB D 9A

SBB E 9B

SBB H 9C

SBB L 9D

Циклы: 1.

Состояния: 4.

Адресация: регистровая.

Флаги: Z, S, P, CY, AC.

SBB M (ВЫЧИТАНИЕ СОДЕРЖИМОГО ЯЧЕЙКИ ПАМЯТИ И БИТА ФЛАГА ПЕРЕНОСА)

(A) ← (A) — ((H) (L)) — (CY)

Содержимое ячейки памяти, адрес которой содержится в регистрах H, L, и бит флага переноса CY вычитаются из содержимого аккумулятора. Результат помещается в аккумулятор.

1	0	0	1	1	1	1	0
---	---	---	---	---	---	---	---

SBB M 9E

Циклы: 2.

Состояния: 7.

Адресация: косвенная регистровая.

Флаги: Z, S, P, CY, AC.

SBI байт (НЕПОСРЕДСТВЕННОЕ ВЫЧИТАНИЕ С ЗАЙМОМ)

$(A) \leftarrow (A) - (\text{байт } 2) - (CY)$

Содержимое второго байта команды и бит флага переноса CY вычитаются из аккумулятора. Результат помещается в аккумулятор.

1	1	0	1	1	1	1	0
Данные							

SBI байт DE

Циклы: 2.

Состояния: 7.

Адресация: непосредственная.

Флаги: Z, S, P, CY, AC.

INR r (УВЕЛИЧЕНИЕ СОДЕРЖИМОГО РЕГИСТРА)

$(r) \leftarrow (r) + 1$

Содержимое регистра r увеличивается на единицу.

Примечание. Команда воздействует на все флаги, кроме флага переноса CY.

0	0	D	D	D	1	0	0
---	---	---	---	---	---	---	---

INR A 3C

INR B 04

INR C 0C

INR D 14

INR E 1C

INR H 24

INR L 2C

Циклы: 1.

Состояния: 4.

Адресация: регистровая.

Флаги: Z, S, P, AC.

INR M (УВЕЛИЧЕНИЕ СОДЕРЖИМОГО ЯЧЕЙКИ ПАМЯТИ)

$((H)(L)) \leftarrow ((H)(L)) + 1$

Содержимое ячейки памяти, адрес которой содержится в регистрах H, L, увеличивается на единицу.

Примечание. Команда воздействует на все флаги, кроме флага переноса CY.

0	0	1	1	0	1	0	0
---	---	---	---	---	---	---	---

INR M 34

Циклы: 3.

Состояния: 10.

Адресация: косвенная регистровая.

Флаги: Z, S, P, AC.

DGR r (УМЕНЬШЕНИЕ СОДЕРЖИМОГО РЕГИСТРА)

Содержимое регистра r уменьшается на единицу.

Примечание. Команда воздействует на все флаги, кроме флага переноса CY.

0	0	D	D	D	1	0	1
---	---	---	---	---	---	---	---

DCR A 3D

DCR B 05

DCR C 0D

DCR D 15

DCR E 1D

DCR H 25

DCR L 2D

Циклы: 1.

Состояния: 4.

Адресация: регистровая.

Флаги: Z, S, P, AC.

DCR M (УМЕНЬШЕНИЕ СОДЕРЖИМОГО ЯЧЕЙКИ ПАМЯТИ)

$((H)(L)) \leftarrow ((H)(L)) - 1$

Содержимое ячейки памяти, адрес которой содержится в регистрах H, L, уменьшается на единицу.

Примечание. Команда воздействует на все флаги, кроме флага переноса CY.

0	0	1	1	0	1	0	1
---	---	---	---	---	---	---	---

DCR M 35

Циклы: 3.

Состояния: 10.

Адресация: косвенная регистровая.

Флаги: Z, S, P, AC.

INX гр (УВЕЛИЧЕНИЕ СОДЕРЖИМОГО ПАРЫ РЕГИСТРОВ)

$(rh)(rI) \leftarrow (rh)(rI) + 1$

Содержимое пары регистров гр увеличивается на единицу.

Примечание. Команда не воздействует на флаги.

0	0	R	P	1	0	1	1
---	---	---	---	---	---	---	---

INX B 03 (пара регистров B, C)

INX D 13 (пара регистров D, E)

INX H 23 (пара регистров H, L)

INX SP 33 (указатель СТЕКа)

Циклы: 1.

Состояния: 6.

Адресация: регистровая.

Флаги: не используются.

DCX гр (УМЕНЬШЕНИЕ СОДЕРЖИМОГО ПАРЫ РЕГИСТРОВ)

$(rh)(rI) \leftarrow (rh)(rI) - 1$

Содержимое пары регистров гр уменьшается на единицу.

Примечание. Команда не воздействует на флаги.

0	0	R	P	1	0	1	1
---	---	---	---	---	---	---	---

DCX B 0B (пара регистров B, C)

DCX D 1B (пара регистров D, E)

DCX H 2B (пара регистров H, L)

DCX SP 3B (указатель СТЕКа)

Циклы: 1.

Состояния: 6.

Адресация: регистровая.

Флаги: не используются.

DAD гр (СЛОЖЕНИЕ СОДЕРЖИМОГО ПАРЫ РЕГИСТРОВ С СОДЕРЖИМЫМ РЕГИСТРОВ Н и L)

$(H)(L) \leftarrow (H)(L) + (r1)(r2)$

Содержимое пары регистров гр складывается с содержимым регистров H, L. Результат помещается в пару регистров H и L.

Примечание. Используется только флаг переноса CY. Он устанавливается, если имеется перенос при сложении с двойной точностью, в противном случае он сбрасывается.

0	0	R	P	1	0	0	1
---	---	---	---	---	---	---	---

DAD B 09 (пара регистров B, C)

DAD D 19 (пара регистров D, E)

DAD H 29 (пара регистров H, L)

DAD SP 39 (указатель СТЕКа)

Циклы: 3.

Состояния: 10.

Адресация: регистровая.

Флаги: CY.

ДАА (ДЕСЯТИЧНОЕ ДОПОЛНЕНИЕ АККУМУЛЯТОРА)

8-битовое число в аккумуляторе дополняется до представления в виде двух 4-битовых чисел в двоично-десятичном коде с помощью следующих операций.

1. Если число, представленное четырьмя младшими битами аккумулятора, больше 9 или установлен флаг вспомогательного переноса AC, то к содержимому аккумулятора добавляется число 6.

2. Если число, представленное четырьмя старшими битами аккумулятора, больше 9 или установлен флаг переноса CY, то число 6 добавляется к числу, образованному четырьмя старшими битами аккумулятора.

Примечание. Используются все флаги.

0	0	1	0	0	1	1	1
---	---	---	---	---	---	---	---

ДАА 27

Циклы: 1.

Состояния: 4.

Флаги: Z, S, P, CY, AC.

Логические команды

Команды этой группы выполняют логические (булевы) операции над данными, хранящимися в регистрах и ячейках памяти, и флагами.

Если нет особых указаний, то все команды воздействуют на флаги нуля, четности, знака, переноса и вспомогательного переноса в соответствии со стандартными правилами.

АНА (ОПЕРАЦИЯ «И» НАД СОДЕРЖИМЫМИ РЕГИСТРА И АККУМУЛЯТОРА)

$(A) \leftarrow (A) \wedge (r)$

Над содержимыми регистра r и аккумулятора выполняется логическая операция И. Результат помещается в аккумулятор. Сбрасывается флаг переноса CY, устанавливается флаг вспомогательного переноса AC.

1	0	1	0	0	S	S	S
---	---	---	---	---	---	---	---

АНА A A7

АНА B A0

АНА C A1

АНА D A2

ANA E A3

ANA H A4

ANA L A5

Циклы: 1.

Состояния: 4.

Адресация: регистровая.

Флаги: Z, S, CY, AC, P.

ANA M (ОПЕРАЦИЯ «И» НАД СОДЕРЖИМЫМИ ЯЧЕЙКИ ПАМЯТИ И АККУМУЛЯТОРА)

$(A) \leftarrow (A) \wedge ((H)(L))$

Над содержимыми ячейки памяти, адрес которой содержится в регистрах H, L, и аккумулятора выполняется логическая операция И. Результат помещается в аккумулятор. Сбрасываются флаги переноса CY и вспомогательного переноса AC.

1	0	1	0	0	1	1	0
---	---	---	---	---	---	---	---

ANA M A6

Циклы: 2.

Состояния: 7.

Адресация: косвенная регистровая.

Флаги: Z, S, P, AC, CY.

ANI байт (НЕПОСРЕДСТВЕННАЯ ОПЕРАЦИЯ «И»)

$(A) \leftarrow (A) \wedge (\text{байт } 2)$

Над содержимым аккумулятора и второго байта команды выполняется логическая операция И. Результат помещается в аккумулятор. Сбрасываются флаги переноса CY и вспомогательного переноса AC.

1	1	1	0	0	1	1	0
Данные							

ANI байт E6

Циклы: 2.

Состояния: 7.

Адресация: непосредственная.

Флаги: Z, S, P, CY, AC.

XRA r (ОПЕРАЦИЯ «ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ» НАД СОДЕРЖИМЫМ РЕГИСТРА И АККУМУЛЯТОРА)

$(A) \leftarrow (A) \vee (r)$

Над содержимым регистра r и аккумулятора выполняется логическая операция ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ. Результат помещается в аккумулятор. Сбрасываются флаги переноса CY и вспомогательного переноса AC.

1	0	1	0	1	1	1	0
---	---	---	---	---	---	---	---

XRA A AF

XRA B A8

XRA C A9

XRA D AA

XRA E AB

XRA H AC

XRA L AD

Циклы: 1.

Состояния: 4.

Адресация: регистровая.

Флаги: Z, S, P, CY, AC.

XRA M (ОПЕРАЦИЯ «ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ» НАД СОДЕРЖИМЫМ ЯЧЕЙКИ ПАМЯТИ И АККУМУЛЯТОРА)

$(A) \leftarrow (A) \vee ((H) (L))$

Над содержимым ячейки памяти, адрес которой содержится в регистрах H, L, и содержимым аккумулятора выполняется операция ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ. Результат помещается в аккумулятор. Сбрасываются флаги переноса CY и вспомогательного переноса AC.

1	0	1	0	1	S	S	S
---	---	---	---	---	---	---	---

XRA M AE

Циклы: 2.

Состояния: 7.

Адресация: косвенная регистровая.

Флаги: Z, S, P, CY, AC.

XRI байт (НЕПОСРЕДСТВЕННАЯ ОПЕРАЦИЯ «ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ»)

$(A) \leftarrow (A) \vee (\text{байт } 2)$

Над содержимым аккумулятора и второго байта команды выполняется операция ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ. Результат помещается в аккумулятор. Сбрасываются флаги переноса CY и вспомогательного переноса AC.

1	1	1	0	1	1	1	0
Данные							

XRI байт EE

Циклы: 2.

Состояния: 7.

Адресация: непосредственная.

Флаги: Z, S, P, CY, AC.

ORA (ЛОГИЧЕСКАЯ ОПЕРАЦИЯ «СЛОЖЕНИЕ (ИЛИ)» СОДЕРЖИМОГО АККУМУЛЯТОРА С СОДЕРЖИМЫМ РЕГИСТРА)

$(A) \leftarrow (A) \vee (r)$

Над содержимым аккумулятора и регистра г выполняется логическая операция ИЛИ. Результат помещается в аккумулятор. Сбрасываются флаги переноса CY и вспомогательного переноса AC.

1	0	1	1	0	S	S	S
---	---	---	---	---	---	---	---

ORA A B7

ORA B B0

ORA C B1

ORA D B2

ORA E B3

ORA H B4

ORA L B5

Циклы: 1.

Состояния: 4.

Адресация: регистровая.

Флаги: Z, S, P, CY, AC.

ORA M (ЛОГИЧЕСКАЯ ОПЕРАЦИЯ «СЛОЖЕНИЕ (ИЛИ)» СОДЕРЖИМОГО ЯЧЕЙКИ ПАМЯТИ ИЛИ АККУМУЛЯТОРА)

$(A) \leftarrow (A) \vee ((H) (L))$

Над содержимым ячейки памяти, адрес которой определен в регистрах H, L, и аккумулятора выполняется логическая операция ИЛИ. Результат помещается в аккумулятор. Сбрасываются флаги переноса CY и вспомогательного переноса AC.

1	0	1	1	0	1	1	0
---	---	---	---	---	---	---	---

ORA M B6

Циклы: 2.

Состояния: 7.

Адресация: косвенная регистровая.

Флаги: Z, S, P, CY, AC.

ORI байт (ЛОГИЧЕСКАЯ ОПЕРАЦИЯ «ИЛИ»)

$(A) \leftarrow (A) \vee (\text{байт } 2)$

Над содержимым второго байта команды и содержимым аккумулятора выполняется логическая операция ИЛИ. Результат помещается в аккумулятор. Сбрасываются флаги переноса CY и вспомогательного переноса AC.

1	1	1	1	0	1	1	0
Данные							

ORI байт F6

Циклы: 2.

Состояния: 7.

Адресация: непосредственная.

Флаги: Z, S, P, CY, AC.

СМР г (СРАВНЕНИЕ СОДЕРЖИМОГО РЕГИСТРА С СОДЕРЖИМЫМ АККУМУЛЯТОРА)

(A) — (г)

Содержимое регистра г сравнивается с содержимым аккумулятора. Аккумулятор не изменяется. По результату сравнения флаги устанавливаются следующим образом: флаг нуля Z — в состояние «1», если $(A) = (г)$; флаг переноса CY — в состояние «1», если $(A) < (г)$.

1	0	1	1	1	S	S	S
---	---	---	---	---	---	---	---

СМР А BF

СМР В B8

СМР С B9

СМР D BA

СМР E BV

СМР H BC

СМР L BD

Циклы: 1.

Состояния: 4.

Адресация: регистровая.

Флаги: Z, S, P, CY, AC.

СМР М (СРАВНЕНИЕ СОДЕРЖИМОГО ЯЧЕЙКИ ПАМЯТИ С СОДЕРЖИМЫМ АККУМУЛЯТОРА)

(A) — ((H) (L))

Содержимое ячейки памяти, адрес которой определен в регистрах H, L, сравнивается с содержимым аккумулятора. Аккумулятор не изменяется. По результату сравнения флаги устанавливаются следующим образом: флаг нуля Z — в состояние «1», если $(A) = ((H) (L))$, флаг переноса CY — в состояние «1», если $A < ((H) (L))$.

1	0	1	1	1	1	1	0
---	---	---	---	---	---	---	---

СМР М BE

Циклы: 2.

Состояния: 7.

Адресация: косвенная регистровая.

Флаги: Z, S, P, CY, AC.

СРІ (байт) (НЕПОСРЕДСТВЕННОЕ СРАВНЕНИЕ)

(A) — (байт 2)

Содержимое второго байта команды вычитается из содержимого аккумулятора. По результату вычитания флаги устанавливаются следующим образом: флаг нуля — в состояние «1», если $(A) = (\text{байт } 2)$; флаг переноса CY — в состояние «1», если $(A) < (\text{байт } 2)$.

1	1	1	1	1	1		0
Данные							

CPI байт FE

Циклы: 2.

Состояния: 7.

Адресация: непосредственная.

Флаги: Z, S, P, CY, AC.

RLC (ЦИКЛИЧЕСКИЙ СДВИГ ВЛЕВО)

$(A_{n+1}) \leftarrow (A_n)$, $(A_0) \leftarrow (A_7)$, $(CY) \leftarrow (A_7)$

Содержимое аккумулятора сдвигается влево на одну позицию. Содержимое самого старшего бита заносится в младший бит и бит флага переноса. Команда воздействует только на флаг переноса CY.

0	0	0	0	0	1	1	1
---	---	---	---	---	---	---	---

RLC 07

Циклы: 1.

Состояния: 4.

Флаги: CY.

RRC (ЦИКЛИЧЕСКИЙ СДВИГ ВПРАВО)

$(A_n) \leftarrow (A_{n+1})$, $(A_7) \leftarrow (A_0)$, $(CY) \leftarrow (A_0)$

Содержимое аккумулятора сдвигается на одну позицию вправо. Содержимое младшего бита заносится в самый старший бит и бит флага переноса. Команда воздействует только на флаг переноса CY.

0	0	0	0	1	1	1	1
---	---	---	---	---	---	---	---

RRC 0F

Циклы: 1.

Состояния: 4.

Флаги: CY.

RAL (СДВИГ ВЛЕВО ЧЕРЕЗ ПЕРЕНОС)

$(A_{n+1}) \leftarrow (A_n)$, $(CY) \leftarrow (A_7)$, $(A_0) \leftarrow (CY)$

Содержимое аккумулятора сдвигается на одну позицию влево через флаг переноса CY. Младший бит устанавливается равным флагу переноса,

а бит флага переноса CY — равным старшему биту аккумулятора. Команда воздействует только на флаг переноса CY.

0	0	0	1	0	1	1	1
---	---	---	---	---	---	---	---

RAL 17

Циклы: 1.

Состояния: 4.

Флаги: CY.

RAR (СДВИГ ВПРАВО ЧЕРЕЗ ПЕРЕНОС)

$(A_n) \leftarrow (A_{n+1}), (CY) \leftarrow (A_0), (A_7) \leftarrow (CY)$

Содержимое аккумулятора сдвигается на одну позицию вправо через бит флага переноса CY. Старший бит аккумулятора устанавливается равным флагу переноса, а флаг переноса — равным младшему биту аккумулятора. Используется только флаг переноса CY.

0	0	0	1	1	1	1	1
---	---	---	---	---	---	---	---

RAR 1F

Циклы: 1.

Состояния: 4.

Флаги: CY.

SMA (ДОПОЛНЕНИЕ АККУМУЛЯТОРА)

$(A) \leftarrow (\bar{A})$

Содержимое аккумулятора инвертируется (бит, равный единице, становится равным нулю; бит, равный нулю, — единице). Флаги не используются.

0	0	1	0	1	1	1	1
---	---	---	---	---	---	---	---

SMA 2F

Циклы: 1.

Состояния: 4.

Флаги: не используются.

SMC (ДОПОЛНЕНИЕ ФЛАГА ПЕРЕНОСА)

$CY \leftarrow (\overline{CY})$

Инвертируется бит флага переноса CY. Другие флаги не используются.

0	0	1	1	1	1	1	1
---	---	---	---	---	---	---	---

SMC 3F

Циклы: 1.

Состояния: 4.

Флаги: CY.

STC (УСТАНОВКА ФЛАГА ПЕРЕНОСА)

(CY) ← 1

Бит флага переноса устанавливается в состояние «1». Другие флаги не используются.

0	0	1	1	0	1	1	1
---	---	---	---	---	---	---	---

STC 37

Циклы: 1.

Состояния: 4.

Флаги: CY.

Команды перехода

Команды этой группы изменяют нормальное последовательное исполнение программы. Исполнение команд не влияет на состояние флагов.

Имеется два типа команд перехода: безусловные и условные. Безусловные команды перехода осуществляют передачу управления, изменяя значение программного счетчика PC. Условные команды перехода сначала проверяют состояние одного из четырех флагов процессора, чтобы определить, выполнено ли указанное в команде условие. Имеются следующие условия перехода:

Условие	Код
NZ — не ноль ($Z=0$)	000
Z — ноль ($Z=1$)	001
NC — нет переноса ($CY=0$)	010
C — есть перенос ($CY=1$)	011
PO — нечетный результат ($P=0$)	100
PE — четный результат ($P=1$)	101
P — плюс ($S=0$)	110
M — минус ($S=1$)	111

JMP (адр.) (ПЕРЕХОД)

(PC) ← (байт 3) (байт 2)

Управление передается команде, адрес которой указан во втором и третьем байтах команды перехода.

1	1	0	0	0	0	1	1
Младший байт адреса							
Старший байт адреса							

JMP (адр.) C3

Циклы: 3.

Состояния: 10.

Адресация: непосредственная.

Флаги: не используются.

J (УСЛОВИЕ) (адр.) (УСЛОВНЫЕ ПЕРЕХОДЫ)

Если (CCC), то (PC) ← (байт 3) (байт 2)

Если указанное условие истинно, то управление передается команде, адрес которой указан во втором и третьем байтах команды перехода. Если условие ложное, то последовательный ход программы не изменяется.

1	1	C	C	C	0	1	0
Младший байт адреса							
Старший байт адреса							

JNZ (адр.) C2

JZ (адр.) CA

JNC (адр.) D2

JC (адр.) DA

JPO (адр.) E2

JPE (адр.) EA

JP (адр.) F2

JM (адр.) FA

Циклы: 3.

Состояния: 10.

Адресация: непосредственная.

Флаги: не используются.

CALL (адр.) (ВЫЗОВ)

((SP) - 1) ← (PCH)

((SP) - 2) ← (PCL)

(SP) ← (SP) - 2

(PC) ← (байт 3) (байт 2)

Старшие 8 бит адреса следующей команды пересылаются в ячейку памяти, адрес которой на единицу меньше содержимого указателя СТЕКа SP. Младшие 8 бит адреса следующей команды пересылаются в ячейку памяти, адрес которой на 2 меньше содержимого указателя СТЕКа SP. Содержимое указателя СТЕКа уменьшается на 2. Управление передается команде, адрес которой указан во втором и третьем байтах команды вызова.

1	1	0	0	1	1	0	1
Младший байт адреса							
Старший байт адреса							

CALL (адр.) CD

Циклы: 5.

Состояния: 18.

Адресация: непосредственная/косвенная регистровая.

Флаги: не используются.

C (УСЛОВИЕ) (адр.) (УСЛОВНЫЙ ВЫЗОВ)

Если (CCC), то $((SP)-1) \leftarrow (PCH)$, $((SP)-2) \leftarrow (PCL)$, $(SP) \leftarrow (SP)-2$
 $(PC) \leftarrow (\text{байт } 3)$ (байт 2)

Если указанное условие истинно, то выполняются действия, описанные в команде CALL, в противном случае последовательность исполнения команд не изменяется.

1	1	C	C	C	1	0	0
Младший байт адреса							
Старший байт адреса							

CNZ (адр.) C4

CZ (адр.) CC

CNC (адр.) D4

CC (адр.) DC

CPO (адр.) E4

CPE (адр.) EC

CP (адр.) F4

CM (адр.) FC

Циклы: 5.

Состояния: 18.

Адресация: непосредственная/косвенная регистровая.

Флаги: не используются.

RET (ВОЗВРАТ)

$(PCL) \leftarrow ((SP))$

$(PCH) \leftarrow ((SP)+1)$

$(SP) \leftarrow (SP)+2$

Содержимое ячейки памяти, адрес которой содержится в указателе СТЕКа SP, пересылается в младшие 8 бит программного счетчика PC. Содержимое ячейки памяти, адрес которой на единицу больше содержимого указателя СТЕКа, пересылается в старшие 8 бит программного счетчика. Содержимое указателя СТЕКа увеличивается на 2.

1	1	0	0	1	0	0	1
---	---	---	---	---	---	---	---

RET C9

Циклы: 3.

Состояния: 10.

Адресация: косвенная регистровая.

Флаги: не используются.

R (УСЛОВИЕ) (УСЛОВНЫЙ ВОЗВРАТ)

Если (CCC), то $(PCL) \leftarrow ((SP)$, $(PCH) \leftarrow ((SP) + 1)$, $(SP) \leftarrow ((SP) + 2)$

Если указанное условие истинно, то выполняются действия, описанные в команде RET, в противном случае последовательность исполнения команд не нарушается.

1	1	C	C	C	0	0	0
---	---	---	---	---	---	---	---

RNZ C0

RZ C8

RNC D0

RC D8

RPO E0

RPE E8

RP F0

RM F8

Циклы: 3.

Состояния: 12.

Адресация: косвенная регистровая

Флаги: не используются.

PST n (РЕСТАРТ)

$((SP) - 1) \leftarrow (PCH)$

$((SP) - 2) \leftarrow (PCL)$

$(SP) \leftarrow ((SP) - 2)$

$(PC) \leftarrow 8 \times (NNN)$

Старшие 8 бит адреса следующей команды пересылаются в ячейку памяти, адрес которой на единицу меньше содержимого указателя СТЕКа. Младшие 8 бит адреса следующей команды пересылаются в ячейку памяти, адрес которой на два меньше содержимого указателя СТЕКа. Содержимое указателя СТЕКа уменьшается на два. Управление передается команде, адрес которой соответствует коду NNN, умноженному на 8.

1	1	N	N	N	1	1	1
---	---	---	---	---	---	---	---

RST 0 C7

RST 1 CF

RST 2 D7

RST 3 DF

RST 4 E7

RST 5 EF

RST 6 F7

RST 7 FF

Циклы: 3.

Состояния: 12.

Адресация: косвенная регистровая.

Флаги: не используются.

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N	N	N	0	0	0

Программный счетчик после рестарта.

PCHL (ЗАГРУЗКА СОДЕРЖИМОГО РЕГИСТРОВ Н и L В ПРОГРАММНЫЙ СЧЕТЧИК)

$(PCH) \leftarrow (H)$

$(PCL) \leftarrow (L)$

Содержимое регистра Н пересылается в старшие 8 бит программного счетчика PC. Содержимое регистра L пересылается в младшие 8 бит программного счетчика.

1	1	1	0	1	0	0	1
---	---	---	---	---	---	---	---

PCHL E9

Циклы: 1.

Состояния: 6.

Адресация: регистровая.

Флаги: не используются.

Команды ввода — вывода, управления, работы со СТЕКОМ

Команды этой группы выполняют операции ввода — вывода, изменяют содержимое СТЕКа и состояние флагов.

Регистр флагов							
D ₇	D ₆	D ₅	D ₄	D ₃	D ₂	D ₁	D ₀
S	Z	X	AC	X	P	X	CY

X — безразлично

PUSH гр (ЗАСЫЛКА В СТЕК СОДЕРЖИМОГО ПАРЫ РЕГИСТРОВ)

$((SP) - 1) \leftarrow (rh)$

$((SP) - 2) \leftarrow (rl)$

$(SP) \leftarrow (SP) - 2$

Содержимое старшего регистра пары регистров гр пересылается в ячейку памяти, адрес которой на единицу меньше содержимого указателя СТЕКа SP. Содержимое младшего регистра пары регистров гр пересылается в ячейку

ку памяти, адрес которой на 2 меньше содержимого указателя СТЕКа. Содержимое указателя СТЕКа уменьшается на 2.

Примечание. Пара регистров $gr = SP$ не может быть указана в команде.

1	1	R	P	0	1	0	1
---	---	---	---	---	---	---	---

PUSH B C5 (заслать пару регистров B, C)

PUSH D D5 (заслать пару регистров D, E)

PUSH H E5 (заслать пару регистров H, L)

Циклы: 3.

Состояния: 12.

Адресация: косвенная регистровая.

Флаги: не используются.

PUSH PSW (ЗАСЫЛКА В СТЕК СЛОВА СОСТОЯНИЯ ПРОГРАММЫ)

$((SP)-1) \leftarrow (A)$

$((SP)-2)_0 \leftarrow (CY), ((SP)-2)_1 \leftarrow X$

$((SP)-2)_2 \leftarrow (P), ((SP)-2)_3 \leftarrow X$

$((SP)-2)_4 \leftarrow (AC), ((SP)-2)_5 \leftarrow X$

$((SP)-2)_6 \leftarrow (Z), ((SP)-2)_7 \leftarrow (S)$

$(SP) \leftarrow (SP) - 2$

X — безразлично.

Содержимое аккумулятора пересылается в ячейку памяти, адрес которой на единицу меньше содержимого указателя СТЕКа SP. Содержимое флагов объединяется в слово состояния, это слово пересылается в ячейку памяти, адрес которой на 2 меньше содержимого указателя СТЕКа. Содержимое указателя СТЕКа уменьшается на 2.

1	1	1	1	0	1	0	1
---	---	---	---	---	---	---	---

PUSH PSW F5

Циклы: 3.

Состояния: 12.

Адресация: косвенная регистровая.

Флаги: не используются.

POP gr (СЧИТЫВАНИЕ ИЗ СТЕКА СОДЕРЖИМОГО ПАРЫ РЕГИСТРОВ)

$(rl) \leftarrow ((SP))$

$(rh) \leftarrow ((SP) + 1)$

$(SP) \leftarrow (SP) + 2$

Содержимое ячейки памяти, адрес которой определяется содержимым указателя СТЕКа SP, пересылается в младший регистр пары регистров gr. Содержимое ячейки памяти, адрес которой на единицу больше содержимого указателя СТЕКа, пересылается в старший регистр пары регистров gr.

Содержимое указателя СТЕКа увеличивается на 2.

Примечание. В команде не может быть указана пара регистров
 $gr = SP$.

1	1	R	P	0	0	1	
---	---	---	---	---	---	---	--

POP B C1 (считать из СТЕКа содержимое в пару регистров B, C)

POP D D1 (считать из СТЕКа содержимое в пару регистров D, E)

POP H E1 (считать из СТЕКа содержимое в пару регистров H, L)

Циклы: 3.

Состояния: 10.

Адресация: косвенная регистровая.

Флаги: не используются.

POP PSW (СЧИТЫВАНИЕ ИЗ СТЕКА СЛОВА СОСТОЯНИЯ ПРОГРАММЫ)

$(CY) \leftarrow ((SP))_0$

$(P) \leftarrow ((SP))_2$

$(AC) \leftarrow ((SP))_4$

$(Z) \leftarrow ((SP))_6$

$(S) \leftarrow ((SP))_7$

$(A) \leftarrow ((SP) + 1)$

$(SP) \leftarrow (SP) + 2$

Содержимое ячейки памяти, адрес которой определяется содержимым указателя СТЕКа SP, используется для восстановления состояния флагов. Содержимое ячейки памяти, адрес которой на единицу больше содержимого указателя СТЕКа, пересылается в аккумулятор. Содержимое указателя СТЕКа увеличивается на 2.

1	1	1	1	0	0	0	1
---	---	---	---	---	---	---	---

POP PSW F1

Циклы: 3.

Состояния: 10.

Адресация: косвенная регистровая.

Флаги: Z, S, P, CY, AC.

XTHL (ОБМЕН СОДЕРЖИМОГО ВЕРХУШКИ СТЕКА И РЕГИСТРОВ H, L)

$(L) \leftarrow ((SP))$

$(H) \leftarrow ((SP) + 1)$

Содержимое регистра L обменивается на содержимое ячейки памяти, адрес которой содержится в указателе СТЕКа SP. Содержимое регистра H обменивается на содержимое ячейки памяти, адрес которой на единицу больше содержимого указателя СТЕКа.

1	1	1	0	0	0	1	1
---	---	---	---	---	---	---	---

XTNL E3

Циклы: 5.

Состояния: 16.

Адресация: косвенная регистровая.

Флаги: не используются.

SPHL (ПЕРЕСЫЛКА СОДЕРЖИМОГО РЕГИСТРОВ H, L В УКАЗАТЕЛЬ СТЕКА)

(SP) ← (H) (L)

Содержимое регистров H и L (16 бит) пересылается в указатель СТЕКа.

1	1	1	1	1	0	0	1
---	---	---	---	---	---	---	---

SPHL F9

Циклы: 1.

Состояния: 6.

Адресация: регистровая.

Флаги: не используются.

IN порт (ВВОД)

(A) ← (Данные)

Данные, имеющиеся в 8 бит двунаправленной шины данных указанного порта, пересылаются в аккумулятор.

1	1	0	1	1	0	1	1
Порт							

IN порт DB

Циклы: 3.

Состояния: 10.

Адресация: прямая.

Флаги: не используются.

OUT порт (ВЫВОД)

(Данные) ← (A)

Содержимое аккумулятора помещается на двунаправленную шину данных для передачи в указанный порт.

1	1	0	1	0	0	1	1
Порт							

OUT порт D3

Циклы: 3.

Состояния: 10.

Адресация: прямая.

Флаги: не используются.

EI (РАЗРЕШЕНИЕ ПРЕРЫВАНИЙ)

Система прерываний разрешается при выполнении следующей за EI команды.

1	1	1	1	1	0	1	1
---	---	---	---	---	---	---	---

EI FB

Циклы: 1.

Состояния: 4.

Флаги: не используются.

Примечание. Прерывания не распознаются во время выполнения команды EI.

DI (ЗАПРЕЩЕНИЕ ПРЕРЫВАНИЙ)

Система прерываний запрещается при выполнении следующей за DI команды.

1	1	1	1	0	0	1	1
---	---	---	---	---	---	---	---

DI F3

Циклы: 1.

Состояния: 4.

Флаги: не используются.

Примечание. Прерывания не распознаются во время выполнения команды DI.

HLT (ОСТАНОВ)

В счетчик PC заносится адрес следующей команды. Процессор затем бездействует до прихода команды прерывания. Состояние регистров и флагов не изменяется.

0	1	1	1	0	1	1	0
---	---	---	---	---	---	---	---

HLT 76

Циклы: 1.

Состояния: 5.

Флаги: не используются.
NOP (НЕТ ОПЕРАЦИИ)

В счетчик РС заносится адрес следующей команды, и микропроцессор переходит к ее обработке. Состояние регистров и флагов не изменяется.

0	0	0	0	0	0	0	0
---	---	---	---	---	---	---	---

NOP 00

Циклы: 1.

Состояния: 4.

Флаги: не используются.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Параметры комплементарных транзисторов

Тип транзисторов	Коэффициент передачи тока h_{21}	h_{11} , Ом	$U_{КЭ \max}$ В	$I_{К \max}$ А	$P_{К \max}$ Вт	$I_{Б \max}$ А	$f_{гр}$, МГц
ГТ 402А—ГТ404А	30—80	20	25	0,5	0,6	0,05	1
ГТ703А—ГТ705А	30—70	10	20	3,5	15	0,04	0,01
КТ 502Д—КТ503Д	40—120	10	60	0,15	0,35	0,1	5
КТ 814А—КТ815А	40	5	25	10	10	0,5	3
КТ 816Б—КТ817Б	20	3	45	3	25	1,0	3
КТ 818А—КТ819А	15	1	25	10	60	3,0	3
КТ 825А—КТ827А	500—18000	2	100	20	125	0,5	10
КТ 3102Д—КТ3107Ж	180—460	160	20	0,1	0,3	0,05	200

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основы промышленной электроники/Под ред. **В. Г. Герасимова**. — М.: Высшая школа, 1986.
2. **Забродин Ю. С.** Промышленная электроника. — М.: Высшая школа, 1982.
3. Интегральные микросхемы: Справочник/Под ред. **Б. В. Тарабрина**. — М.: Радио и связь, 1984.
4. Полупроводниковые приборы: диоды, тиристоры, оптоэлектронные приборы: Справочник/Под ред. **Н. Н. Горюнова**. — М.: Энергоиздат, 1982.
5. Справочник по микроэлектронной импульсной технике. **В. Н. Яковлев, В. В. Воскресенский, С. И. Мирошниченко** и др. — Киев: Техника, 1983.
6. Транзисторы для аппаратуры широкого применения: Справочник/Под ред. **Б. Л. Перельмана**. — М.: Радио и связь, 1981.
7. **Шило В. М.** Функциональные аналоговые интегральные микросхемы. — М.: Радио и связь, 1982 (Советско-венгерская библиотека по радиоэлектронике).
8. **Чурбаков А. В.** Диодный оптрон в генераторах прямоугольных импульсов. — В сб.: Полупроводниковая электроника в технике связи/Под ред. **И. Ф. Николаевского**. Вып. 21. — М.: Радио и связь, 1981.
9. **Горбачев Г. Н., Чаплыгин Е. Е.** Промышленная электроника. — М.: Энергоатомиздат, 1988.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Общие методические рекомендации по выполнению лабораторных работ	5
Техника безопасности при проведении лабораторных работ	8
Лабораторная работа № 1. Исследование источников вторичного электропитания	9
Лабораторная работа № 2. Исследование простейших транзисторных усилителей	26
Лабораторная работа № 3. Исследование дифференциального усилителя и бестрансформаторного усилителя мощности	42
Лабораторная работа № 4. Исследование операционных усилителей	52
Лабораторная работа № 5. Исследование автогенераторов синусоидальных колебаний	67
Лабораторная работа № 6. Исследование импульсных устройств	79
Лабораторная работа № 7. Исследование логических элементов и устройств	88
Лабораторная работа № 8. Исследование регистров, счетчиков и дешифраторов	98
Лабораторная работа № 9. Исследование оптоэлектронных приборов и устройств	104
Лабораторная работа № 10. Исследование аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей	117
Лабораторная работа № 11. Исследование микропроцессора	126
Приложения	142
Приложение 1. Описание универсального лабораторного стенда	142
Приложение 2. Набор команд микропроцессора КР580ИК80	143
Приложение 3. Параметры комлементарных транзисторов	173
Список литературы	174

Учебное издание

Князьков Олег Михайлович
Краснопольский Александр Евгеньевич
Культиасов Петр Сергеевич
Покровский Алексей Дмитриевич
Чернов Леонид Андреевич

**ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ
ПО ОСНОВАМ
ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ**

Зав. редакцией *В. И. Трефилов*
Редактор *Т. И. Артемова*
Мл. редактор *В. В. Пашенкова, Т. Ф. Артюхина*
Художественный редактор *Т. М. Скворцова*
Обложка художника *А. И. Шаварда*
Технический редактор *Е. И. Герасимова*
Корректор *Г. И. Кострикова*

ИБ № 8027

Изд. № ЭР-472. Сдано в набор 04.11.88. Подп. в печать 12.06.89. Формат 60×88¹/₁₆. Бум. кн.-журн. Гарнитура литературная. Печать офсетная. Объем 10,78 усл. печ. л. 11,03 усл. кр.-отт. 10,28 уч.-изд. л. Тираж 30 000 экз. Зак. № 918. Цена 35 коп.

Издательство «Высшая школа». 101430, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., д. 29/14.

Московская типография № 8 Союзполиграфпром при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 101898, Москва, Центр, Хохловский пер., 7.