

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Электротехника и электроника»

ПРАКТИКУМ ПО ЭЛЕКТРОНИКЕ

Пособие
для студентов специальностей
1-43 01 01 «Электрические станции»,
1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети»,
1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)»,
1-43 01 09 «Релейная защита и автоматика»

В 2 частях

Часть 1

*Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию
в области энергетики и энергетического оборудования*

Минск
БНТУ
2022

УДК 621.38(076.5)(075.8)

ББК 32.85я7

П69

А в т о р ы:

*Ю. В. Бладыко, Г. А. Михальцевич, Т. Е. Жуковская,
И. В. Новаш, Л. И. Новикова*

Р е ц е н з е н т ы:

кафедра электроники УО «Белорусский государственный
университет информатики и радиоэлектроники»
(зав. кафедрой, канд. техн. наук, доцент *С. М. Сацук*);
доцент УО «Белорусский государственный аграрный
технический университет», канд. техн. наук *И. П. Матвеевко*

П69

Практикум по электронике : пособие для студентов специальностей 1-43 01 01 «Электрические станции», 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети», 1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)», 1-43 01 09 «Релейная защита и автоматика» : в 2 ч. / Ю. В. Бладыко [и др.]. – Минск : БНТУ, 2022. – Ч. 1. – 109 с.
ISBN 978-985-583-404-6 (Ч. 1).

Первая часть пособия по курсам «Электроника» и «Электроника и информационно-измерительная техника» предназначена для студентов электротехнических специальностей. Содержание пособия соответствует действующим программам курсов и включает десять лабораторных работ. Работы предусматривают расчетную и экспериментальную части. Предварительный расчет к эксперименту студенты должны выполнять в период самостоятельной подготовки к работе, затем проверить полученные результаты опытным путем, провести дополнительные экспериментальные исследования.

УДК 621.38 (076.5)

ББК 32.85я7

ISBN 978-985-583-404-6 (Ч. 1)

ISBN 978-985-583-405-3

© Белорусский национальный
технический университет, 2022

Лабораторная работа № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ И ТИРИСТОРОВ

Цель работы: выяснение механизма образования *n-p*-перехода; снятие вольт-амперных характеристик выпрямительного диода и стабилитрона; ознакомление с принципом действия тиристора и снятие его основных характеристик.

Общие сведения

К полупроводниковым относятся материалы, которые при комнатной температуре имеют удельное сопротивление $\rho = 10^{-3} \dots 10^{10}$ Ом·см, зависящее от температуры, освещенности, ионизирующего излучения, электрического поля и др.

Для изготовления полупроводниковых приборов применяют простые полупроводниковые вещества – германий, кремний, селен – и некоторые химические соединения, например, арсенид галлия GaAs, антимонид индия InSb, фосфид индия InP, карбид кремния SiC.

Полупроводники имеют кристаллическую структуру, которая однородна при температуре абсолютного нуля. По мере нагрева часть валентных связей нарушается вследствие тепловых колебаний в кристаллической решетке, что приводит к одновременному образованию свободных электронов и незаполненных связей (дырок). Генерация пар носителей заряда может происходить также под действием света, электрического поля, излучения и др.

Электропроводность собственного полупроводника, обусловленную парными носителями заряда (электронами и дырками), называют *собственной*. Вводя в собственный полупроводник примеси, получают *примесную* электропроводность. Донорные примеси, атомы которых отдают электроны, образуют полупроводники с преобладающей электронной электропроводностью (*n*-типа). Полупроводники с преобладающей дырочной электропроводностью называют *полупроводниками p-типа*, а соответствующие примеси – *акцепторами*.

Область на границе контакта двух полупроводников с противоположным типом электропроводности называется *электронно-ды-*

рочным, или *n-p-переходом*. Переход обладает несимметричной проводимостью, т. е. имеет нелинейное сопротивление. Работа большинства полупроводниковых приборов (диодов, тиристоров и др.) основана на использовании свойств *n-p-переходов*.

Рассмотрим процессы в *n-p-переходе* при отсутствии внешнего источника напряжения (рис. 1.1). Так как носители заряда совершают беспорядочное тепловое движение, то происходит их диффузия из одного полупроводника в другой. Концентрация электронов в *n-слое* больше, чем в *p-слое*, и часть электронов перейдет из *n-слоя* в *p-слой*. Одновременно наблюдается диффузионный переход дырок из *p-слоя* в *n-слой*. В результате в *n-слое* остается нескомпенсированный объемный заряд положительных ионов (в основном донорной примеси), а в *p-слое* – нескомпенсированный объемный заряд отрицательных ионов акцепторной примеси. Между образовавшимися объемными зарядами возникают *контактная разность потенциалов* $U_k = \varphi_n - \varphi_p$ и электрическое поле напряженностью E_k . На потенциальной диаграмме *n-p-перехода* (рис. 1.1, б) за нулевой принят потенциал граничного слоя. В *n-p-переходе* возникает *потенциальный барьер*, препятствующий диффузионному перемещению носителей заряда. Высота барьера равна контактной разности потенциалов и обычно составляет десятые доли вольта. На рис. 1.1, б, изображен барьер для дырок, стремящихся за счет диффузии перемещаться из области *p* в *n*.

Таким образом, в *n-p-переходе*, вследствие ухода электронов и дырок вглубь *p-* и *n-*областей, образуется обедненный зарядами слой, называемый *запирающим* и обладающий большим сопротивлением, в сравнении с сопротивлением остальных объемов *n-* и *p-*областей.

Если источник внешнего напряжения положительным полюсом подключить к полупроводнику *p-*типа, а отрицательным – к *n-*типа (прямое включение), то электрическое поле, создаваемое в *n-p-переходе* прямым напряжением $U_{пр}$, действует навстречу контактной разности потенциалов U_k . Потенциальный барьер понижается до величины $U_k - U_{пр}$, уменьшаются толщина запирающего слоя и его сопротивление $R_{пр}$.

Если полярность внешнего источника изменить на обратную, то потенциальный барьер возрастает до величины $U_k + U_{обр}$. В этом случае через переход могут пройти только неосновные носители:

электроны из p -области в n -область и дырки во встречном направлении. Так как концентрация основных носителей заряда на несколько порядков выше концентрации неосновных, то прямые токи на несколько порядков больше обратных. Электронно-дырочный переход обладает *выпрямляющими* свойствами, которые используются для создания диодов.

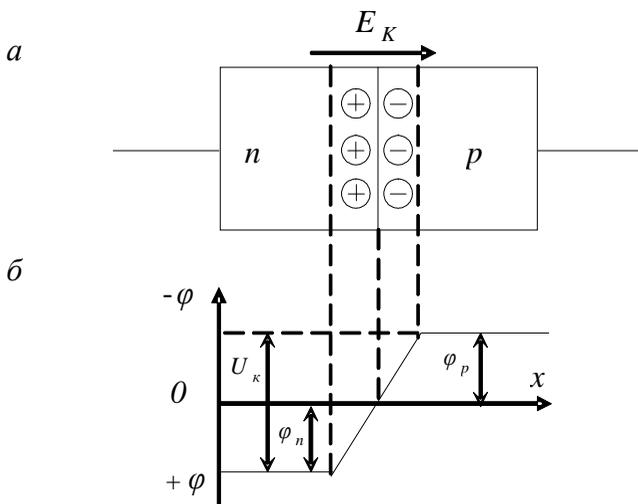


Рис. 1.1. Процессы в n - p -переходе при отсутствии внешнего источника напряжения:
 a – p - n -переход; b – потенциальная диаграмма

Диодом называют полупроводниковый прибор с одним n - p -переходом и двумя внешними выводами. По назначению диоды делят на *выпрямительные, высокочастотные, импульсные, стабилитроны* и т. д. Их изготавливают на основе германия или кремния.

Выпрямительные диоды предназначены для преобразования переменного тока низкой частоты в постоянный. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) выпрямительного диода, его условное графическое изображение и буквенное обозначение даны на рис. 1.2. *Основные параметры выпрямительного диода:* предельно допустимый постоянный ток диода $I_{пр. \max}$ и максимально допустимое обратное напряжение $U_{обр. \max}$.

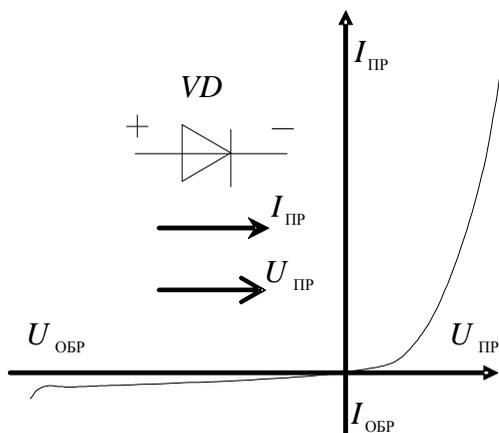


Рис. 1.2. Обозначение и вольт-амперная характеристика выпрямительного диода

Стабилитрон представляет собой кремниевый полупроводниковый диод, который нормально работает при электрическом пробое *n-p*-перехода. При этом напряжение на диоде незначительно зависит от протекающего тока. Электрический пробой не вызывает разрушения перехода, если ограничить ток до допустимой величины. Стабилитроны применяют для стабилизации постоянного напряжения. ВАХ стабилитрона и его условное графическое обозначение приведены на рис. 1.3. *Основные параметры стабилитрона*: напряжение стабилизации $U_{ст. ном}$, минимальный $I_{ст. min}$ и максимальный $I_{ст. max}$ токи стабилизации, максимальная мощность $P_{ст. max}$.

Тиристором называют полупроводниковый прибор с тремя или более *n-p*-переходами и двумя (*динистор*) или тремя (*тринистор*) выводами. Он может находиться в одном из двух устойчивых состояний: низкой (закрыт) или высокой проводимости (открыт). Структура, условное графическое и буквенное обозначения тиристора, его вольт-амперная характеристика приведены на рис. 1.4, а, б, в.

Основу прибора составляет кристалл кремния, в котором созданы четыре слоя с разными типами электропроводности. Внешний *p*-слой называют *анодом* (А), внешний *n*-слой – *катодом* (К), а два внутренних слоя – *базами*. Одна из баз имеет вывод – *управляющий электрод* (УЭ).

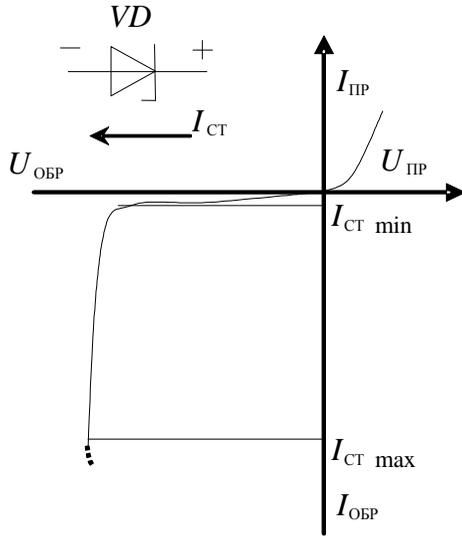


Рис. 1.3. Обозначение и вольт-амперная характеристика стабилитрона

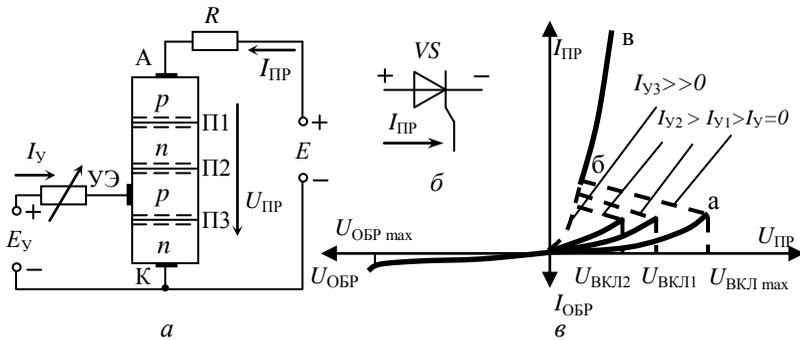


Рис. 1.4. Тиристор:

а – структура; *б* – обозначение; *в* – вольт-амперная характеристика

При прямом включении (анод положителен по отношению к катоду) переходы П1 и П3 смещены в прямом направлении, а переход П2 – в обратном.

До тех пор, пока П2 закрыт, прямой ток практически равен нулю (участок *оа* характеристики (рис. 1.4, *в*)). При некотором значении

прямого напряжения, равном $U_{\text{вкл. max}}$, за счет перераспределения зарядов в области баз переход П2 открывается (точка a) – *династическое включение*. Сопротивление его быстро уменьшается (участок ab), и тиристор работает на участке bc характеристики, которая подобна ВАХ диода.

Напряжение включения $U_{\text{вкл. max}}$ можно уменьшить введением добавочных носителей заряда в любой из слоев, прилегающих к переходу П2. Добавочные носители заряда I_y на рис. 1.4, a , вводятся в слой p от вспомогательной управляющей цепи с независимым источником E_y . При увеличении тока управления I_y характеристика (рис. 1.4, b) смещается влево (к естественной прямой ветви ВАХ диода). Если $I_y \gg 0$ и напряжение на аноде положительное, тиристор начинает работать как тринистор с токовым включением по управляющему электроду. Тиристор остается во включенном состоянии пока протекающий через него ток больше критического, называемого *током удержания* $I_{\text{уд}}$. Как только $I_{\text{пр}}$ станет меньше $I_{\text{уд}}$, тиристор закрывается.

Следует отметить, что после включения тиристора объемные заряды в области перехода П2 будут компенсированы основным током, если он больше тока $I_{\text{уд}}$, и тогда ток управления I_y не нужен. Поэтому для снижения потерь энергии, применяемой для включения тиристора, он, чаще всего, управляется короткими импульсами I_y .

При обратном включении тиристора (анод отрицателен по отношению к катоду) закрыты два перехода П1 и П3 и тиристор тока не проводит. Во избежание пробоя необходимо, чтобы обратное напряжение было меньше $U_{\text{обр. max}}$.

Основные параметры тиристорov: предельно допустимый анодный ток в открытом состоянии тиристора $I_{\text{пр. max}}$, предельно допустимое обратное напряжение $U_{\text{обр. max}}$, предельно допустимое прямое напряжение в закрытом состоянии тиристора $U_{\text{пр. max}}$, ток удержания $I_{\text{уд}}$, температура корпуса тиристора, от которой зависят его предельные параметры.

Маломощные тиристоры применяют в релейных схемах и маломощных коммутирующих устройствах. Мощные тиристоры используют в управляемых выпрямителях, инверторах и различных преобразователях.

Предварительное задание к эксперименту

Изучить устройство и принцип работы выпрямительного диода, стабилитрона, тиристора. Письменно дать обоснованный ответ на вопрос соответствующего варианта (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Вариант	Вопрос
1	Можно ли с помощью тока управления закрыть тиристор?
2	Рассчитайте прямое сопротивление выпрямительного диода, если $I_{пр} = 0,05$ А, $U_{пр} = 0,67$ В. Как изменится $R_{пр}$ при увеличении тока диода?
3	Можно ли с помощью тока управления включить тиристор при анодном напряжении, практически равном нулю?
4	Рассчитайте статическое сопротивление стабилитрона, если $U_{ст} = 4$ В, $I_{ст} = 0,05$ А. Как изменится $R_{ст}$ при увеличении тока стабилитрона?
5	Нужно ли поддерживать ток управления после включения тиристора для дальнейшей его работы в открытом состоянии?
6	Рассчитайте сопротивление открытого тиристора при $U_{пр} = 1$ В, $I_{пр} = 0,19$ А. Как изменится $R_{пр}$ при увеличении тока тиристора?
7	Как следует изменить ток управления тиристора для уменьшения напряжения его включения?
8	Что такое ток удержания тиристора? Закроется ли тиристор при уменьшении прямого тока, если $I_{пр} > I_{уд}$?

Порядок выполнения эксперимента

1. Изучить лабораторный стенд по схеме рис. 1.5. Установить регулятор потенциометра $R2$ в крайнее левое положение, переключателем П2.1 подключить выпрямительный диод.

2. Включить цепь под напряжением с помощью шнура питания стенда и, регулируя напряжение потенциометром $R2$, снять ВАХ диода в прямом направлении $I_{пр}(U_{пр})$. Результаты измерений записать в табл. 1.2.

3. Проверить экспериментом ответ на вопрос предварительного задания (*вариант 2*).

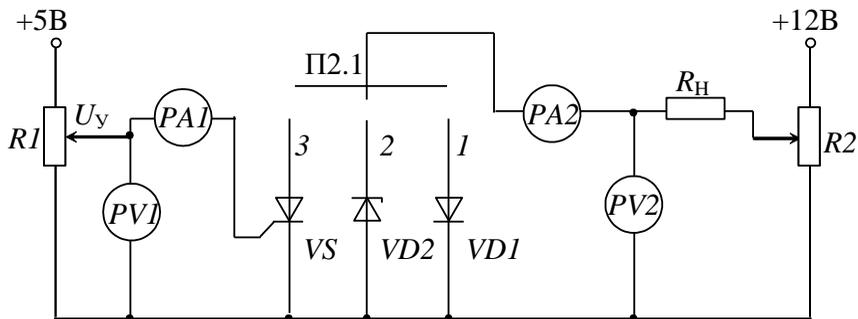


Рис. 1.5. Схема лабораторной установки

Таблица 1.2

$I_{\text{пр}}, \text{мА}$						
$U_{\text{пр}}, \text{В}$						

4. Установить потенциометр $R2$ в исходное положение (п. 1), затем подключить стабилитрон и снять его обратную ветвь ВАХ $I_{\text{обр}}(U_{\text{обр}})$. Измерения записать в табл. 1.3.

Таблица 1.3

$I_{\text{обр}}, \text{мА}$						
$U_{\text{обр}}, \text{В}$						

5. Проверить экспериментом ответ на вопрос предварительного задания (*вариант 4*).

6. Снять характеристику включения тиристора $U_{\text{вкл}}(I_y)$. Для этого переключателем подключить тиристор, регуляторы $R1$, $R2$ установить в крайние левые положения. Регулируя анодное напряжение от 0 до 12 В, ступенями через 2 В, и медленно увеличивая ток управления I_y до момента включения тиристора, зафиксировать и записать в табл. 1.4 значения тока управления. Построить характеристику включения тиристора $U_{\text{вкл}}(I_y)$.

Таблица 1.4

$U_{\text{вкл}}, \text{В}$	0	2	4	6	8	10	12
$I_{\text{y}}, \text{мА}$							

7. Снять характеристику прямой передачи тока тиристора $I_{\text{пр}}(I_{\text{y}})$: потенциометром $R1$ установить ток $I_{\text{y}} = 0$, а потенциометром $R2$ – напряжение $U_{\text{пр}} = 8 \text{ В}$, затем увеличивать ток управления до момента включения тиристора, записать значения $I_{\text{y}}, I_{\text{пр}}$. Увеличивая далее I_{y} до 20 мА, убедиться в постоянстве анодного тока. Результаты эксперимента зафиксировать и записать в табл. 1.5. Построить график $I_{\text{пр}}(I_{\text{y}})$.

Таблица 1.5

$I_{\text{y}}, \text{мА}$							
$I_{\text{пр}}, \text{мА}$							

8. Снять вольт-амперную характеристику тиристора $I_{\text{пр}}(U_{\text{пр}})$, установив ток управления, при котором открывается тиристор (см. п. 6). Результаты измерений представить таблицей, подобно табл. 1.6. Построить график ВАХ.

Таблица 1.6

$I_{\text{пр}}, \text{мА}$						
$U_{\text{пр}}, \text{В}$						

9. Проверить экспериментом ответы на вопросы предварительного задания (*варианты 1, 3, 5...8*).

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Ответ на вопрос предварительного задания.
3. Схема исследований (см. рис. 1.5).
4. Таблицы измерений.
5. ВАХ выпрямительного диода, стабилитрона и тиристора.

6. Характеристики включения $U_{\text{вкл}}(I_{\text{y}})$ и прямой передачи $I_{\text{пр}}(I_{\text{y}})$ тиристора.

7. Сравнение прямых падений напряжений на диоде, стабилитроне и тиристоре.

8. Выводы о возможном практическом использовании выпрямительных диодов, стабилитронов и тириستоров.

Контрольные вопросы

1. Что представляет собой собственная и примесная электропроводности?

2. Что такое n - p -переход и как объяснить его вентильные свойства?

3. Чем обусловлена контактная разность потенциалов n - p -перехода?

4. Охарактеризуйте состояния n - p -перехода при прямом и обратном включении.

5. Поясните графики ВАХ диода и стабилитрона. Как влияет температура на ВАХ?

6. Каковы основные параметры и области применения диодов и стабилитронов?

7. Поясните устройство и принцип работы тиристора, вид его ВАХ.

8. Каково влияние тока управления на работу тиристора?

9. Что такое динистор, тринистор, одноперационный и двухперационный (запираемый) тиристоры? Области их применения.

Лабораторная работа № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ БИПОЛЯРНОГО И ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРОВ

Цель работы: изучение устройства и принципа работы транзисторов; снятие их статических характеристик в схемах с общим эмиттером и общим истоком, определение основных параметров; сравнительный анализ.

Общие сведения

Биполярным транзистором называют полупроводниковый прибор с двумя *n-p*-переходами, образованными слоями полупроводникового материала *n-p-n*- или *p-n-p*-типа. Он имеет три или более вывода, изготавливается на основе германия или кремния, обеспечивает усиление мощности электрических сигналов. На рис. 2.1 приведены структурные схемы, условные графические и буквенные обозначения транзисторов *n-p-n*- (рис. 2.1, а) и *p-n-p*-типа (рис. 2.1, б).

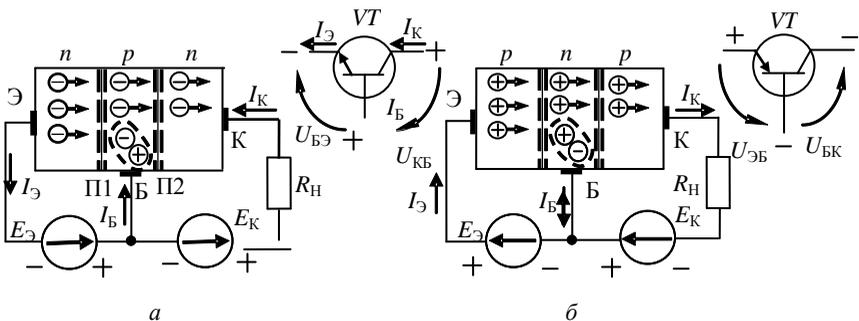


Рис. 2.1. Структура и обозначение биполярного транзистора:
а – *n-p-n*-типа; б – *p-n-p*-типа

Средний слой кристалла называют *базой* (Б). Ее толщина мала, составляет несколько микрометров, и концентрация примесей здесь значительно меньше, чем в соседних слоях. Крайние слои называют *эмиттером* (Э) и *коллектором* (К).

Для нормальной работы транзистора между его выводами должны быть включены источники питания. Если источники включены так, что оба перехода П1, П2 находятся под обратным напряжением, то токи транзистора практически равны нулю – этот режим называют *отсечкой*.

Если переходы транзистора имеют прямое смещение, то их сопротивление мало и транзистор можно рассматривать как узел цепи. Такой режим работы называют *насыщением*.

В усилительном каскаде транзистор работает в *активном режиме*, при этом эмиттерный переход смещен в прямом направлении, а коллекторный – в обратном (см. рис. 2.1). *Прямосмещенный* эмиттерный переход имеет небольшое сопротивление, зависящее от входного тока. *Коллекторный* переход, при отсутствии инжекции из эмиттера, имеет очень большое сопротивление (может быть несколько МОм). Поэтому в цепь коллектора можно включать нагрузку с большим сопротивлением, в определенных пределах, зависящим от напряжения питания. При этом ток коллектора меняется незначительно.

Под действием источника E_3 , основные носители заряда из эмиттера преодолевают *n-p*-переход и попадают в область базы, где частично рекомбинируют с основными носителями заряда базы, образуя ток базы $I_б$. Так как концентрация дырок (для *n-p-n*-типа) и электронов (для *p-n-p*-типа) в базе мала, то не все инжектированные из эмиттера заряды рекомбинируют. Большинство зарядов, вследствие диффузии и поля источника $E_к$, преодолевают коллекторный переход и образуют ток коллектора.

Коэффициент передачи тока эмиттера

$$\alpha = \Delta I_k / \Delta I_3, \text{ при } U_{кб} = \text{const.}$$

В современных транзисторах база очень тонкая и $\alpha = 0,99$ и больше.

Если $I_3 = 0$, то будет небольшой ток через коллекторный переход $I_{к0}$, обусловленный движением неосновных носителей заряда.

Рассмотренная на рис. 2.1 схема включения транзистора называется *схемой с общей базой* (ОБ), так как база является общим электродом для входной и выходной цепей. Она обеспечивает усиление сигнала по напряжению и мощности, но ток в нагрузке будет меньше, чем входной ток источника сигнала.

Наиболее часто используется в электронных устройствах *схема* включения транзистора с *общим эмиттером* (ОЭ) (рис. 2.2, а). Входным здесь является ток базы I_B , а выходным – ток коллектора I_K .

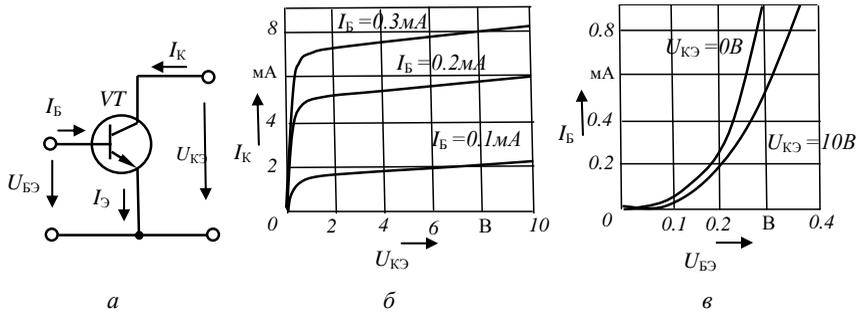


Рис. 2.2. Биполярный транзистор *n-p-n*-типа:
 а – схема включения с общим эмиттером;
 б – выходные характеристики; в – входные характеристики

Коэффициент передачи тока базы схемы ОЭ

$$\beta = \Delta I_K / \Delta I_B, \text{ при } U_{КЭ} = \text{const};$$

$$\beta = \alpha / (1 - \alpha) \gg 1.$$

Эта схема обеспечивает усиление тока и напряжения сигнала и максимальное усиление мощности.

Основными характеристиками транзисторов с ОЭ являются:

- 1) выходные – $I_K(U_{КЭ})$, при $I_B = \text{const}$ (рис. 2.2, б);
- 2) входные – $I_B(U_{БЭ})$, при $U_{КЭ} = \text{const}$ (рис. 2.2, в).

Они определяют связь между постоянными составляющими токов и напряжений, дают возможность выбрать наилучший режим работы, оценить нелинейные искажения усиливаемого сигнала.

Для расчета цепей с биполярными транзисторами в настоящее время используются *h*-параметры: транзистор представляют четырехполюсником; записывают уравнения четырехполюсника в *h*-параметрах. Коэффициенты четырехполюсника (*h*-параметры) выражаются следующим образом:

$$-h_{11} = \Delta U_{БЭ} / \Delta I_B, \text{ при } U_{КЭ} = \text{const}, \text{ – входное сопротивление } R_{вх}, \text{ Ом};$$

– $h_{12} = \Delta U_{\text{бэ}} / \Delta U_{\text{кэ}}$, при $I_6 = \text{const}$, – безразмерный коэффициент обратной связи по напряжению;

– $h_{21} = \Delta I_{\text{к}} / \Delta I_6$, при $U_{\text{кэ}} = \text{const}$, – безразмерный коэффициент передачи тока β ;

– $h_{22} = \Delta I_{\text{к}} / \Delta U_{\text{кэ}}$, при $I_6 = \text{const}$, – выходная проводимость ($1 / R_{\text{вых}}$), См.

h – параметры приводятся в справочниках, а также могут быть определены по семейству входных и выходных характеристик транзистора.

Биполярные транзисторы управляются током и потребляют заметную мощность от входной цепи. Указанного недостатка лишены *полевые транзисторы* (ПТ) – это полупроводниковые приборы с каналом, ток в котором управляется электрическим полем. Принцип их действия основан на использовании носителей заряда только одного знака (электронов или дырок), поэтому их иначе называют *униполярными*.

Главным достоинством ПТ является высокое входное сопротивление, т. е. они практически не потребляют ток из входной цепи. Кроме того, они более технологичны и дешевле, чем биполярные, обладают хорошей воспроизводимостью требуемых параметров.

По способу создания канала различают ПТ с управляющим *n-p*-переходом, со встроенным и индуцированным каналами. Последние два типа относятся к разновидностям МДП-транзисторов с изолированным затвором.

У ПТ с управляющим *n-p*-переходом (рис. 2.3, а) канал – это слой полупроводника *n*-типа (может быть *p*-типа), заключенный между двумя *n-p*-переходами. Канал имеет два вывода во внешнюю цепь: *исток* (И), из которого заряды входят в канал, *сток* (С), в который заряды выходят из канала. Слои *p*-типа соединены между собой и имеют вывод во внешнюю цепь, называемый *затвором* (З). Затвор служит для регулирования поперечного сечения канала. Особенность ПТ в том, что движение основных носителей заряда только одного знака происходит по каналу от истока к стоку, а не через переход, как в биполярном транзисторе.

Управляющее напряжение между З и И является обратным для обоих *n-p*-переходов ($U_{\text{зи}} < 0$). Оно вызывает вдоль канала равномерный слой, обедненный носителями заряда, при $U_{\text{си}} = 0$. Изменяя

$U_{зи}$, изменяют ширину n - p -переходов, тем самым регулируют сечение токопроводящего канала и его проводимость.

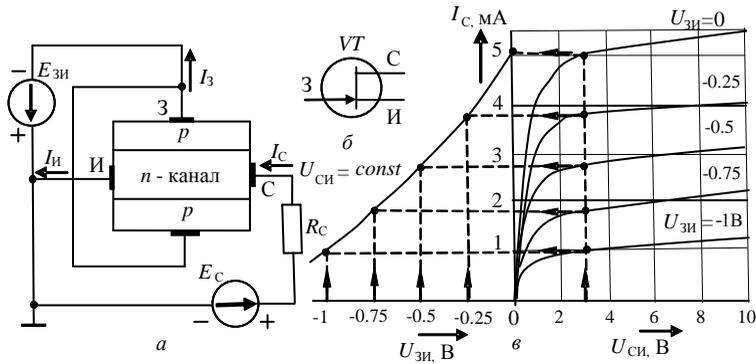


Рис. 2.3. Полевой транзистор с управляющим n - p -переходом:
 а – структура; б – обозначение на схеме;
 в – передаточные и выходные характеристики

Напряжение $U_{си} > 0$ вызывает неравномерность обедненного зарядами слоя, наименьшее сечение канала вблизи стока.

Управляющее действие затвора иллюстрируют *передаточной* (стоко-затворной) характеристикой $I_c(U_{зи})$, при $U_{си} = const$. На практике чаще используют *выходные* (стоковые) характеристики $I_c(U_{си})$, при $U_{зи} = const$, по которым строят передаточные (рис. 2.3, в).

МДП-транзисторы со встроенным каналом имеют структуру металл – диэлектрик – полупроводник. У поверхности кристалла полупроводника (подложки p -типа) созданы две области n -типа и тонкая перемычка между ними – *канал* (рис. 2.4, а). Области n -типа имеют выводы: И – *исток* и С – *сток*. Кристалл покрыт окисной пленкой диэлектрика SiO_2 , на которой расположен металлический *затвор* (3), электрически изолированный от цепи исток – сток. Подложка соединяется с истоком внутри прибора либо имеет вывод во внешнюю цепь (П).

При отрицательном потенциале на затворе ($U_{зи} < 0$) поле затвора выталкивает электроны из канала в p -подложку, исток и сток. Канал обедняется электронами, его сопротивление увеличивается, а ток стока уменьшается.

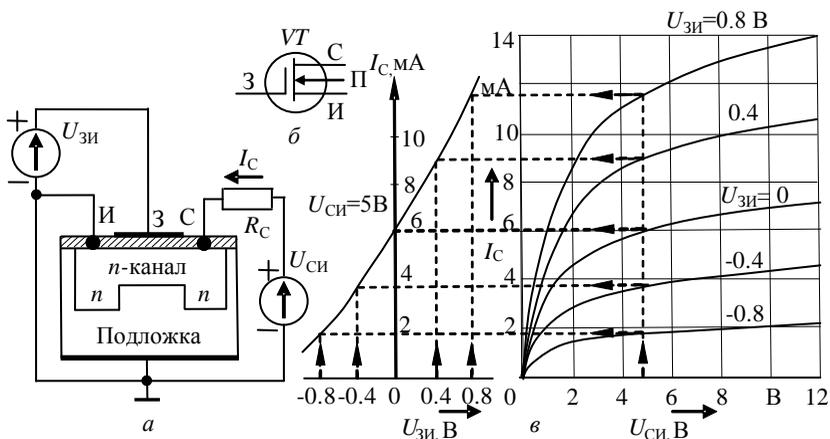


Рис. 2.4. МДП транзистор со встроенным каналом n -типа:
 а – структура; б – обозначение на схеме;
 в – передаточные и выходные характеристики

Такой режим называют *режимом обеднения*. Характеристики $I_c(U_{си})$ располагаются ниже кривой, при $U_{зи} = 0$ (рис. 2.4, в). Если на затвор подано $U_{зи} > 0$, то под действием поля затвора канал насыщается электронами из p -подложки, истока и стока – это *режим обогащения*.

Таким образом, МДП-транзистор со встроенным каналом может работать как в режиме обеднения, так и в режиме обогащения, что наглядно показывают его характеристики. Структура, условное графическое изображение, передаточная $I_c(U_{зи})$, при $U_{си} = \text{const}$, и стоковые $I_c(U_{си})$, при $U_{зи} = \text{const}$, характеристики ПТ со встроенным каналом даны на рис. 2.4, а, б, в.

МДП-транзисторы с индуцированным каналом не имеют специально созданного канала между истоком и стоком, и при $U_{зи} = 0$ выходной ток $I_c = 0$. Канал индуцируется при положительном потенциале на затворе ($U_{зи} > 0$) благодаря притоку электронов из p -подложки, истока и стока. Этот прибор работает только в режиме обогащения.

Основными параметрами полевых транзисторов являются *крутизна* $S = \Delta I_c / \Delta U_{зи}$, при $U_{си} = \text{const}$, и *внутреннее (выходное) сопротивление* $R_i = \Delta U_{си} / \Delta I_c$, при $U_{зи} = \text{const}$. Иногда пользуются третьим параметром: *коэффициентом усиления* $\mu = \Delta U_{си} / \Delta U_{зи}$, при $I_c = \text{const}$; $\mu = SR_i$.

Предварительное задание к эксперименту

1. По характеристикам биполярного транзистора с ОЭ (см. рис. 2.2, б, в) определить заданный вариантом табл. 2.1 параметр транзистора, указать размерность, пояснить физический смысл.

Таблица 2.1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
Параметр	h_{11}	h_{12}	h_{21}	h_{22}	$R_{\text{вх}}$	$\beta = \Delta I_{\text{к}} / \Delta I_{\text{б}}$	$R_{\text{вых}}$	$k_U = \Delta U_{\text{кз}} / \Delta U_{\text{бэ}}$
$U_{\text{си}}, \text{В}$	5	3	10	4	6	4,5	7	5,5

2. По стоковой характеристике полевого транзистора (см. рис. 2.4, в) построить передаточную характеристику $I_{\text{с}}(U_{\text{зи}})$ при заданном в табл. 2.1 напряжении $U_{\text{си}}$. Определить крутизну S , внутреннее сопротивление R_i , при $U_{\text{зи}} = 0$, и коэффициент усиления μ .

3. Сравнить свойства биполярного и полевого транзисторов.

Порядок выполнения эксперимента

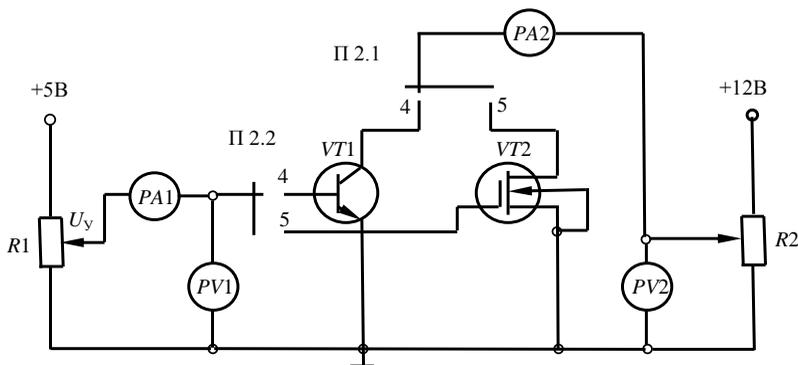


Рис. 2.5. Схема лабораторной установки

1. Подготовить схему рис. 2.5 для исследования биполярного транзистора $VT1$: регуляторы $R1$ и $R2$ установить в крайние левые положения, переключатель $\text{П}2$ установить в положение 4 . После проверки преподавателем подключить схему к источнику напряжения.

2. Снять семейство выходных (коллекторных) характеристик транзистора $I_k(U_{кэ})$, при $I_б = \text{const}$. Для этого тумблер управляющего напряжения включить в положение «+», регулятором $R1$ установить значение $I_б$, согласно табл. 2.2, и, изменяя регулятором $R2$ напряжение $U_{кэ}$ от 0 до 8...10 В, записать значения тока коллектора I_k в табл. 2.2.

Проверить работу транзистора при $I_б = 0$.

Таблица 2.2

		$U_{кэ}, \text{В}$	0	0,2	0,5	1,0	2,0	5,0	8...10
$I_k, \text{мА}$ при	$I_б = 0,1 \text{ мА}$								
	$I_б = 0,2 \text{ мА}$								
	$I_б = 0,3 \text{ мА}$								
	$I_б = 0,4 \text{ мА}$								

3. Снять семейство входных характеристик $I_б(U_{бэ})$, при $U_{кэ} = 0$ и при $U_{кэ} = 8...10 \text{ В}$. Для этого регулятором $R2$ установить напряжение $U_{кэ}$ и, поддерживая его постоянным, изменять регулятором $R1$ ток базы согласно табл. 2.3. Значения напряжения $U_{бэ}$ записать в табл. 2.3.

Таблица 2.3

		$I_б, \text{мА}$	0	0,1	0,2	0,4	0,6
$U_{бэ}, \text{мВ}$ при	$U_{кэ} = 0$						
	$U_{кэ} = 8...10 \text{ В}$						

4. Регуляторы $R1$ и $R2$ установить в крайние левые положения. Переключатель П2.1 установить в положение 5 для исследования полевого транзистора $VT2$.

5. Снять семейство выходных (стоковых) характеристик МДП-транзистора $I_c(U_{си})$, при $U_{зи} = \text{const}$. С этой целью регулятором $R1$ поочередно установить заданные значения напряжения $U_{зи}$ (табл. 2.4) и, поддерживая $U_{зи} = \text{const}$, изменять регулятором $R2$ напряжение $U_{си}$ от 0 до 8...10 В. Значения тока стока записать в табл. 2.4 (во избежание повреждения транзистора ток стока не должен превышать 18 мА).

Таблица 2.4

$U_{си}, \text{В}$		0	0,2	0,5	1,0	2	3	4	6	8...10
$I_c, \text{мА}$ при	$U_{зи} = 0,8 \text{ В}$									
	$U_{зи} = 0,4 \text{ В}$									
	$U_{зи} = 0$									
	$U_{зи} = -0,4 \text{ В}$									
	$U_{зи} = -0,8 \text{ В}$									

6. Снять передаточные характеристики $I_c(U_{зи})$, при $U_{си} = \text{const}$. Для этого регулятором $R2$ установить заданные значения напряжения $U_{си}$ (табл. 2.5) и, изменяя $U_{зи}$ согласно табл. 2.5, записать значения тока стока.

Таблица 2.5

$U_{зи}, \text{В}$		0,8	0,4	0	-0,4	-0,8
$I_c, \text{мА}$ при	$U_{си} = 5 \text{ В}$					
	$U_{си} = 8...10 \text{ В}$					

7. По результатам пп. 2, 3 и пп. 5, 6 построить характеристики. По характеристикам пп. 2, 3 определить параметр биполярного транзистора, заданный вариантом предварительного задания. По характеристикам пп. 5, 6 определить крутизну S , внутреннее сопротивление R_i и коэффициент усиления μ полевого транзистора. Сравнить эти значения с полученными в предварительном задании.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Расчет предварительного задания к эксперименту с вычерченными на миллиметровой бумаге графиками характеристик биполярного и полевого транзисторов (см. рис. 2.2, б, в; 2.4, в).
3. Сравнительный анализ биполярного и полевого транзисторов.
4. Схема экспериментальной установки (рис. 2.5).
5. Таблицы измерений.

6. На графиках рис. 2.2, б, в, и 2.4, в, нанести экспериментальные точки.

7. Зависимость $\beta(I_k)$, при $U_{кз} = 10$ В.

8. Расчет максимального значения крутизны передаточной характеристики полевого транзистора, при $U_{си} = 10$ В.

Контрольные вопросы

1. Как образуется *n-p*-переход и каковы его свойства?
2. Каково устройство биполярного транзистора? Принцип его работы в схеме с общей базой и с общим эмиттером.
3. Как изображают на схемах транзисторы *n-p-n*- и *p-n-p*-типов?
4. Какова полярность напряжений между электродами транзисторов *n-p-n*- и *p-n-p*-типов?
5. Какие функции выполняют эмиттер и коллектор?
6. Объясните характер входных и выходных характеристик биполярного транзистора.
7. Почему запрещается отключать вывод базы при наличии напряжения на эмиттере и коллекторе?
8. Что представляет собой обратный ток коллекторного перехода?
9. Объясните физический смысл *h*-параметров транзисторов. Как они определяются по входным и выходным характеристикам?
10. Почему коэффициент усиления по току β не остается постоянным при изменении тока эмиттера?
11. Каковы конструкции полевых транзисторов с *n-p*-переходом и с изолированным затвором?
12. Принцип действия полевых транзисторов, их основные характеристики и параметры.
13. Что такое напряжение отсечки полевого транзистора, как оно определяется?
14. Что такое ток насыщения транзистора и как он определяется?
15. Каковы преимущества полевых транзисторов перед биполярными?

Лабораторная работа № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ С ФИЛЬТРАМИ

Цель работы: изучение устройства, принципа действия и режимов работы однофазных выпрямителей и сглаживающих фильтров.

Общие сведения

Выпрямителем называют устройство, предназначенное для преобразования электрической энергии источника переменного тока в электрическую энергию, потребляемую приемником постоянного тока. Такое преобразование необходимо в том случае, когда первичным источником электроэнергии является однофазная (трехфазная) сеть или автономный генератор переменного тока, а потребитель электроэнергии работает на постоянном токе.

Для потребителей постоянного тока, мощностью до нескольких сотен ватт, используют *однофазные выпрямители*, подключаемые к однофазной сети переменного тока. Однофазные выпрямители, как правило, входят в состав *источников вторичного электропитания* (ИВЭ) радио- и телевизионных, измерительных, вычислительных электронных устройств, применяют для питания электродвигателей постоянного тока, зарядки аккумуляторных батарей и др.

Для потребителей постоянного тока, мощностью более 1 кВт, используют *трехфазные выпрямители*, подключаемые к промышленной трехфазной сети.

Структурная схема традиционного однофазного источника питания постоянного тока представлена на рис. 3.1.

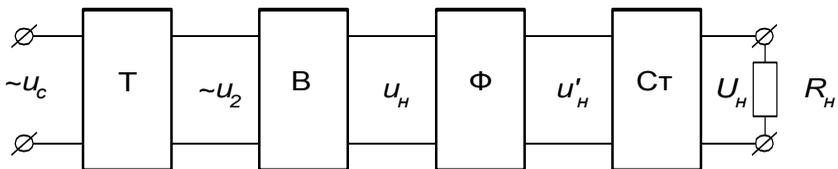


Рис. 3.1. Структурная схема однофазного источника питания постоянного тока

Основным и обязательным элементом схемы является *выпрямитель (В) на полупроводниковых вентилях*. Принцип действия любого выпрямителя основан на односторонней проводимости вентилях, преобразующих переменный ток в пульсирующий ток постоянного направления. Для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения после выпрямителя может быть включен сглаживающий фильтр Φ , а при необходимости постоянства величины напряжения U_n на нагрузке – стабилизатор напряжения Ст. Выпрямитель подключается к питающей сети переменного тока через трансформатор Т в случае, если требуется преобразование уровня напряжения питающей сети U_c к необходимому уровню напряжения нагрузки U_n , а также для электрического разделения цепей.

Основными недостатками выпрямителей с трансформаторным входом являются большие габариты, масса трансформатора и сглаживающего фильтра. В малогабаритных ИВЭ электронной аппаратуры применяют схемы с бестрансформаторным входом, работа которых основана на многократном преобразовании электрической энергии. В таких схемах выпрямитель подключен непосредственно к питающей сети, а согласование уровней напряжений сети и нагрузки производится трансформатором на повышенной промежуточной частоте переменного тока, что позволяет значительно уменьшить габариты и массу трансформатора и фильтра.

В данной работе рассматриваются два вида неуправляемых однофазных выпрямителей: *однополупериодный* и *двухполупериодный мостовой*. В неуправляемых выпрямителях нет возможности регулировать величину выпрямленного напряжения, потому что они выполняются на неуправляемых вентилях – *полупроводниковых диодах*. При анализе работы выпрямителей будем считать вентили и трансформатор идеальными, т. е. сопротивление диодов при прямом включении равно нулю, при обратном – бесконечности; для трансформатора пренебрегаем сопротивлением рассеяния и активным сопротивлением обмоток.

Однофазный однополупериодный выпрямитель содержит один вентиль VD , включенный в цепь вторичной обмотки трансформатора Т последовательно с нагрузкой R_n (рис. 3.2, а). Временные диаграммы напряжений и токов, поясняющие работу выпрямителя на

активную нагрузку без фильтра, представлены на рис. 3.2, б. В первый полупериод напряжения вторичной обмотки трансформатора $u_2 = U_{2m} \sin(\omega t)$, когда оно положительно, диод VD открыт, т. к. на его аноде действует положительный потенциал. На этом интервале времени $0 - (T/2)$ через нагрузку будет протекать ток $i_H = \frac{U_{2m}}{R_H} \sin(\omega t)$, являющийся для диода прямым током. При этом $u_B = 0$, $u_H = u_2 = U_{2m} \sin(\omega t)$. На втором полупериоде напряжение u_2 становится отрицательным и диод закрывается под действием отрицательного потенциала на аноде диода.

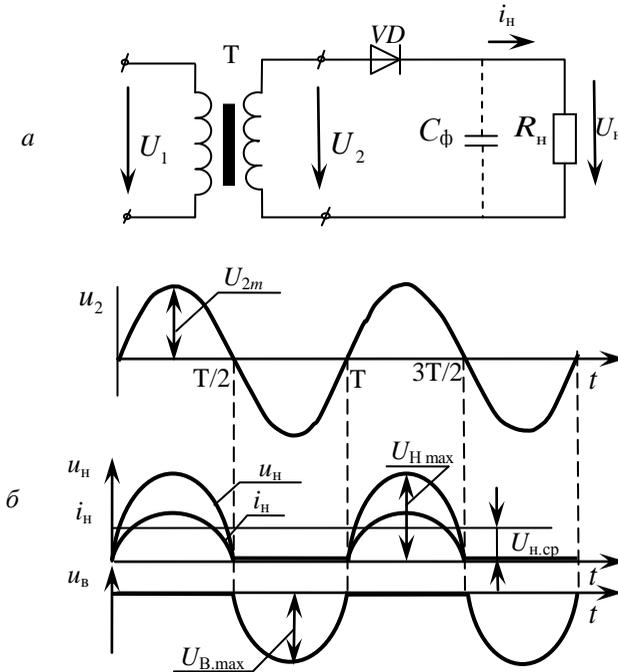


Рис. 3.2. Однофазный однополупериодный выпрямитель:
 а – электрическая схема; б – временные диаграммы напряжения и тока

На этом интервале времени $(T/2) - T$ $i_H = 0$, $u_H = 0$, напряжение на вентиле $u_B = u_2 = U_{2m} \sin(\omega t)$ будет являться обратным напряжением

диода. В результате такой работы вентиля ток через нагрузку будет протекать в течение только одного полупериода переменного напряжения u_2 и вызывать на нагрузке периодическое несинусоидальное напряжение u_H , среднее значение которого может быть определено

$$U_H = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} U_{2m} \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{U_{2m}}{\pi} = \frac{\sqrt{2}U_2}{\pi} = 0,45U_2.$$

Средний ток через вентиль $I_{пр}$ равен среднему току нагрузки ($I_{пр} = I_H$).

Максимальное напряжение на закрытом вентиле

$$U_{в. \max} = U_{2m} = \sqrt{2}U_2 = \pi U_H = 3,14U_H.$$

Действующее значение напряжения вторичной обмотки трансформатора

$$U_2 = \frac{\pi}{\sqrt{2}} U_H = 2,22U_H.$$

Действующее значение тока вторичной обмотки трансформатора

$$I_2 = \frac{\pi U_H}{2R_H} \approx 1,57I_H.$$

Расчетная мощность трансформатора

$$S_T = (S_1 + S_2) / 2 \approx S_2 = U_2 I_2 = 2,22U_H 1,57I_H \approx 3,5P_H.$$

Недостатками *однополупериодного* выпрямителя являются большой уровень пульсаций выпрямленного напряжения, вынужденное намагничивание сердечника трансформатора за счет постоянной составляющей тока вторичной обмотки, плохое использование трансформатора ($S_T = 3,5P_H$), низкие коэффициенты использования вентиляей

$$K_I = I_{в. \max} / I_H = \pi; \quad K_U = U_{в. \max} / U_H = \pi.$$

Однополупериодные выпрямители применяются для питания маломощных усилителей, электронно-лучевых трубок и в высоковольтных установках для испытания изоляции.

Однофазный двухполупериодный мостовой выпрямитель состоит из четырех вентиляей, включенных по мостовой схеме (рис. 3.3, а). К одной диагонали моста подано переменное напряжение $u_2 = U_{2m} \sin(\omega t)$, к другой – подключена нагрузка R_n . Временные диаграммы напряжений и токов представлены на рис. 3.3, б. В первый полупериод напряжения u_2 , когда потенциал на аноде $VD1$ положительный диоды $VD1$ и $VD3$ открыты и ток нагрузки протекает через $VD1$, R_n и $VD3$. В этом интервале времени $u_n = u_2$, диоды $VD2$ и $VD4$ закрыты и находятся под обратным напряжением. На втором полупериоде напряжение u_2 становится отрицательным и диоды $VD1$ и $VD3$ будут теперь в закрытом состоянии находиться под обратным напряжением, а диоды $VD2$ и $VD4$ – открыты. Ток i_n будет протекать через $VD2$, $VD4$ и через нагрузку R_n в том же направлении, что и в предыдущий полупериод.

В результате такой попарной работы диодов ток в нагрузке будет протекать в течение двух полупериодов и вызывать напряжение u_n , среднее значение которого будет в два раза больше, чем при однополупериодном выпрямлении:

$$U_n = 2U_m / \pi = 0,9U_2; \quad U_2 = 1,1U_n; \quad I_2 = 1,1I_n.$$

Так как пары диодов проводят ток нагрузки поочередно по полупериода, то прямой ток вентиляей $I_{пр} = 0,5I_n$.

Максимальное напряжение на закрытых вентилях

$$U_{в. \max} = U_{2m} = 1,57U_n.$$

Расчетная мощность трансформатора

$$S_T = S_1 = S_2 = U_2 I_2 = 1,23P_n.$$

Двухполупериодный выпрямитель в сравнении с однополупериодным имеет следующие преимущества: выпрямленные ток и напряжение вдвое больше, значительно меньший уровень пульсаций u_n ,

вентили выбираются по половине тока нагрузки, хорошо используется трансформатор и отсутствует вынужденное подмагничивание его сердечника. Мостовая схема имеет преобладающее применение в выпрямителях небольшой и средней мощности.

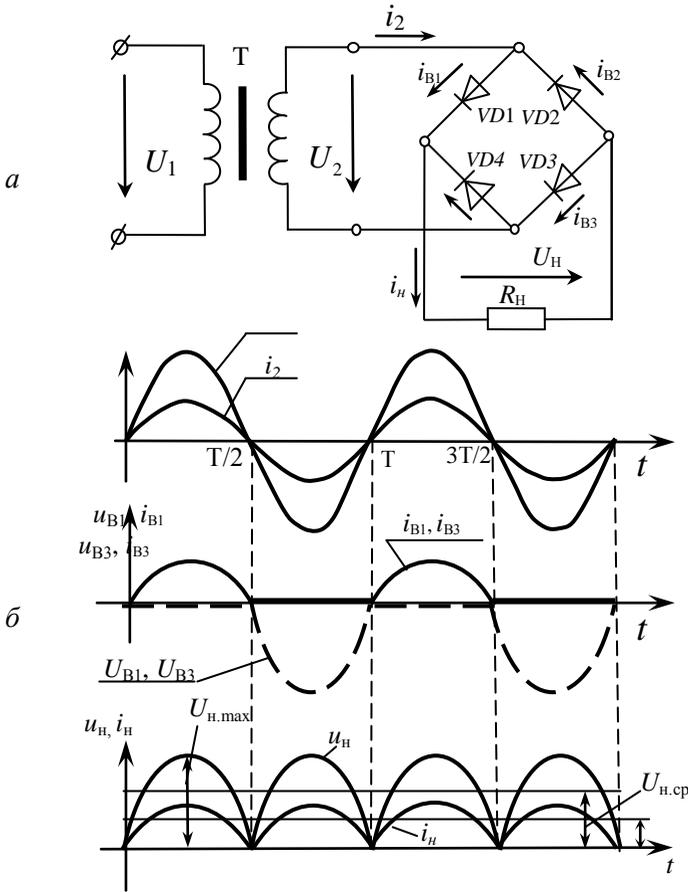


Рис. 3.3. Однофазный двухполупериодный мостовой выпрямитель:
 а – электрическая схема;
 б – диаграммы напряжений и тока

Для оценки пульсаций выпрямленного напряжения пользуются понятием *коэффициента пульсаций* q , который равен отношению

амплитуды первой гармоники выпрямленного напряжения к среднему значению:

$$q = U_{1Гм} / U_{н. ср.}$$

Для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения применяют *сглаживающие фильтры*. Основными элементами *пассивных* фильтров являются реактивные элементы: *конденсаторы* и *дроссели*. На базе *транзисторов* и *операционных усилителей* выполняются более сложные *активные* фильтры. Эффективность фильтра характеризуется *коэффициентом сглаживания*, равным отношению коэффициентов пульсаций до и после установки фильтра:

$$S = \frac{q_{вх}}{q_{вых}}$$

Емкостный фильтр состоит из конденсатора, подключаемого параллельно нагрузке, при этом напряжение $u_n = u_c$ определяется процессами заряда и разряда конденсатора.

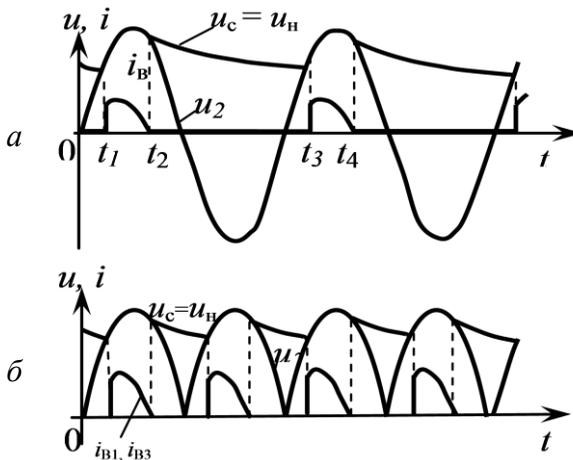


Рис. 3.4. Диаграммы напряжений и токов емкостного фильтра:
 а – для однополупериодного выпрямителя;
 б – для двухполупериодного мостового выпрямителя

В однополупериодном выпрямителе конденсатор C_{ϕ} будет заряжаться через вентиль, если $u_2 > u_C$ (интервал времени t_1-t_2 на рис. 3.4). Когда $u_2 < u_C$ (t_2-t_3), вентиль закрыт и конденсатор разряжается через сопротивление нагрузки R_n с постоянной времени

$$\tau_p = C_{\phi}R_n;$$

при этом

$$u_n = u_C = U_{C_{\max}} e^{-t/\tau_p}.$$

Временная диаграмма для двухполупериодного мостового выпрямителя показана на рис. 3.4, б.

Достоинствами *емкостного фильтра* являются простота, повышенное напряжение на нагрузке и хорошее сглаживание при малых выходных токах. С увеличением тока нагрузки при уменьшении R_n уменьшается постоянная разряда конденсатора и возрастает коэффициент пульсаций на нагрузке. Емкостный фильтр целесообразно использовать при высокоомной нагрузке с малым значением выпрямленного тока.

Индуктивный фильтр состоит из индуктивной катушки (дросселя), включаемой последовательно с нагрузкой. Дроссель с индуктивностью L_{ϕ} не оказывает сопротивления постоянной составляющей тока нагрузки, но подавляет переменные составляющие тока, для которых реактивное сопротивление катушки возрастает с увеличением частоты высших гармоник.

Недостатками *индуктивных фильтров* являются большие габариты и масса дросселя, поэтому такие фильтры применяются преимущественно в трехфазных выпрямителях большой и средней мощности при низкоомной нагрузке с большими значениями токов.

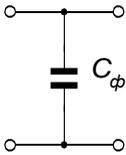
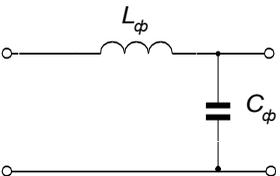
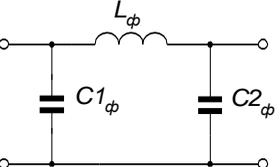
Для более эффективного сглаживания применяют составные или многозвенные фильтры, коэффициент сглаживания которых равен произведению коэффициентов сглаживания отдельных звеньев:

$$S_{\phi} = S_1 \cdot S_2 \cdot \dots \cdot S_n.$$

К составным фильтрам можно отнести Г- и П-образные LC-фильтры (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Типы фильтров

Тип фильтра	Коэффициент сглаживания фильтра	Условия эффективной работы
1. Емкостный 	$S_C = 2\pi f_1 m R_H C_\phi,$ где m – число пульсаций выпрямленного напряжения	$\frac{1}{\omega_{\Pi(1)} C_\phi} \ll R_H;$ $C_\phi \gg \frac{1}{\omega_{\Pi(1)} R_H},$ где $\omega_{\Pi(1)}$ – частота основной гармоники пульсаций
2. Индуктивный 	$S_L = \frac{2\pi f_1 m L_\phi}{R_H}$	$R_\phi \ll R_H;$ $\omega_{\Pi(1)} L_\phi \gg R_H;$ $L_\phi \gg \frac{R_H}{\omega_{\Pi(1)}}$
3. Г-образный 	$S_\Gamma = S_L S_C =$ $= m^2 \omega^2 C_\phi L_\phi,$ где $\omega = 2\pi f_1$	$\omega_{\Pi(1)} L_\phi = (5-10) R_H;$ $\frac{1}{\omega_{\Pi(1)} C_\phi} \leq (0,1-0,2) R_H$
4. П-образный 	$S_\Pi = S_{C1} S_\Gamma$	Задавшись $C_{\phi 1} = C_{\phi 2}$, определяют S_{C1} , $S_\Gamma = \frac{S_\Pi}{S_{C1}}$

Расчет выпрямителя сводится к выбору вентиляй, определению типа и параметров фильтра и трансформатора. Исходными данными к расчету являются напряжение $U_1 = U_c$ и частота f_1 питающей сети, напряжение U_H и мощность P_H нагрузки.

Для надежной работы вентилях их выбирают из условия, чтобы среднее значение тока через открытый вентиль $I_{пр}$ и максимальное обратное напряжение на закрытом вентиле $U_{в. \max}$ не превышали допустимый прямой ток вентиля $I_{пр. \max}$ и обратное максимальное напряжение $U_{обр. \max}$.

$$I_{пр} < I_{пр. \max} \text{ и } U_{в. \max} < U_{обр. \max}.$$

$I_{пр}$ и $U_{в. \max}$ рассчитываются из соотношений, приведенных в табл. 3.2 для соответствующей выпрямительной схемы, а $I_{пр. \max}$ и $U_{обр. \max}$ определяются из справочника для выбираемых вентилях.

Выбор трансформатора проводится по расчетной мощности S_T и коэффициенту трансформации $k_T = U_1 / U_2$ (табл. 3.2).

Таблица 3.2

Схема	$U_2 / U_{н. \text{ср}}$	$I_2 / I_{н}$	$I_1 k_T / I_{н}$	$S_T / P_{н}$	$U_{в. \max} / U_{н}$	$I_B / I_{н}$	q	m
Однополу- периодная	2,22	1,57	1,21	3,5	3,14	1	1,57	1
Мостовая	1,11	1,11	1,11	1,23	1,57	0,5	0,667	2

При расчете фильтра известными являются величина допустимого коэффициента пульсаций на нагрузке $q_n = q_{\text{вых}}$, коэффициент пульсаций выпрямителя $q = q_{\text{вх}}$ и соотношения определяемых параметров фильтра с его коэффициентом сглаживания (табл. 3.1).

Основной характеристикой выпрямителя является *внешняя*, которая показывает зависимость выходного напряжения от тока нагрузки $U_n = f(I_n)$. Приблизительный расчет выходного напряжения выпрямителя с учетом внутреннего падения напряжения на вторичной обмотке трансформатора, вентилях и элементах фильтра может быть выполнен по формуле

$$U_n = U_{н. \text{ср}}^{XX} - (R_T + R_{пр} + R_{\phi}) I_n = U_{н. \text{ср}}^{XX} - R_{\text{вых}} I_n,$$

где $U_{н. \text{ср}}^{XX}$ – выходное напряжение выпрямителя в режиме холостого хода;

R_T – сопротивление вторичной обмотки трансформатора;

$R_{пр}$ – суммарное сопротивление открытых вентилях;

R_{ϕ} – суммарное сопротивление фильтра.

Предварительное задание к эксперименту

1. Для заданного в табл. 3.3 выпрямителя и указанных там же значений напряжения U_n , мощности P_n нагрузки рассчитать прямой ток вентилей $I_{пр}$, обратное напряжение $U_{в. макс}$. Определить для трансформатора напряжение вторичной обмотки U_2 , коэффициент трансформации k_t , расчетную мощность S_t , если напряжение питающей сети $U_1 = 220$ В, частота $f_1 = 50$ Гц. Рассчитать параметры сглаживающего фильтра для обеспечения коэффициента пульсаций напряжения нагрузки q_n , согласно данным табл. 3.3. Для составных фильтров принять $C_\phi = 20$ мкФ. Результаты расчетов записать в табл. 3.4.

Таблица 3.3

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
Тип выпрямителя	Рис. 3.2	Рис. 3.3	Рис. 3.2	Рис. 3.3	Рис. 3.2	Рис. 3.3	Рис. 3.2	Рис. 3.3
U_n , В	7	13	8	14	8,5	15	9	16
P_n , Вт	1,2	4	0,4	4	0,05	3	0,01	1,6
Тип фильтра	L	Г-обр. LC	П-обр. LC	L	C	Г-обр. LC	C	П-обр. LC
q_n	0,02		0,01		0,01		0,02	

Таблица 3.4

Параметры	I_n , мА	$I_{пр}$, мА	$U_{в. макс}$, В	U_2 , В	k_t	S_t , Вт	S	C_ϕ , мкФ	L_ϕ , Гн
Вычислено									

2. Рассчитать и построить внешнюю характеристику для заданного в табл. 3.3 выпрямителя, приняв его $R_{вых} = 10 \dots 15$ Ом в диапазоне изменения нагрузочного тока от 0 до 500 мА.

Примечание: объем предварительного задания может быть уменьшен по указанию преподавателя.

Порядок выполнения эксперимента

1. Ознакомиться с устройством стенда для исследования однофазных выпрямителей.

2. Подключить, согласно рис. 3.5, к выходным клеммам выпрямительного устройства нагрузку R_n , вольтметр PV , амперметр PA и осциллограф. Подать питание на стенд и измерительные приборы.

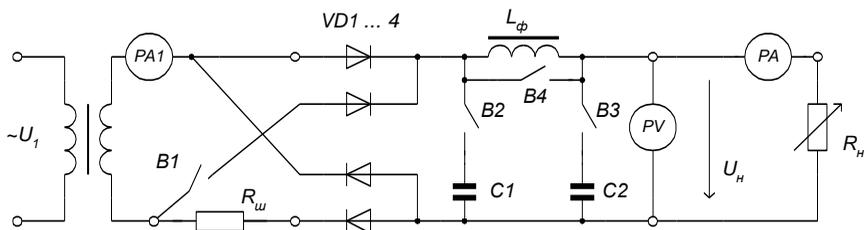


Рис. 3.5. Электрическая схема лабораторной установки

3. В режиме холостого хода для однополупериодного ($B1$ отключен) и мостового ($B1$ включен) выпрямителей установить регулятором напряжения $U1$ максимальное выходное напряжение, измерить его значения и определить кратность напряжений $U_2 / U_{н. ср}$ в режиме работы без фильтра ($B2$ и $B3$ отключены, $B4$ включен).

4. Изменяя сопротивлением R_n ток нагрузки выпрямителя I_n от 0 до максимального значения, снять внешние характеристики однополупериодного и мостового выпрямителей при работе без фильтра; с емкостным; индуктивным; Г-образным; П-образным фильтрами. Результаты измерений записать в табл. 3.5. Обратить внимание на изменение напряжения на нагрузке и увеличение потребления переменного тока при включении конденсаторов фильтра.

Таблица 3.5

Тип выпрямителя									
без фильтра		с С-фильтром		с L-фильтром		с Г-обр. LC		с П-обр. CLC	
I_n	U_n	I_n	U_n	I_n	U_n	I_n	U_n	I_n	U_n
0		0		0		0		0	

5. Зарисовать с экрана осциллографа кривые выпрямленного напряжения на нагрузке для всех режимов работы выпрямителей, согласно п. 4. При работе с фильтром график напряжения зарисовать для режима холостого хода и максимальной нагрузки. На рисунках показать масштабную сетку, ось времени и значения масштабов по напряжению и времени.

6. Подключить осциллограф на шунт $R_{ш}$, получить на экране осциллографа и зарисовать временную диаграмму тока вентиля $i_B(t)$ при максимальном токе нагрузки и отключенном фильтре.

7. По результатам измерений (табл. 3.5) построить в единой системе координат внешние характеристики выпрямителей $U_n(I_n)$ при работе с разными типами фильтров. Сопоставить внешнюю характеристику, рассчитанную в предварительном задании, с экспериментальными. Рассчитать по экспериментальным характеристикам $R_{вых}$ выпрямителей при работе без фильтра, сравнить расчетные значения с диапазоном значений в предварительном задании.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Схема лабораторной установки (рис. 3.5).
3. Расчет предварительного задания.
4. Внешние характеристики выпрямителей без фильтра и с фильтрами в общей системе координат.
5. Осциллограммы временных диаграмм напряжений и токов.

Контрольные вопросы

1. Объясните принцип действия выпрямителей.
2. Как влияет емкостный фильтр на величину обратного напряжения на вентиле?
3. Почему уменьшаются пульсации выпрямленного напряжения при включении емкостного или индуктивного фильтра?
4. Достоинства и недостатки разных типов фильтров.
5. Что такое коэффициент пульсаций и коэффициент сглаживания?
6. По каким критериям осуществляется выбор вентиля?
7. Как определяется мощность трансформатора в выпрямителях?
8. Как изменится форма напряжения на нагрузке при пробое одного вентиля в исследуемых выпрямителях?

Лабораторная работа № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛИЗАТОРОВ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА

Цель работы: изучение устройства, принципа действия и исследование характеристик компенсационного стабилизатора напряжения и стабилизатора тока.

Общие сведения

Стабилизатором называют устройство, автоматически поддерживающее с заданной точностью напряжение или ток в нагрузке при изменении питающего напряжения или сопротивления нагрузки в заданных пределах.

Основным параметром стабилизатора напряжения является *коэффициент стабилизации напряжения*, а стабилизатора тока – *коэффициент стабилизации тока*:

$$K_{\text{ст. } U} = \frac{\Delta U_{\text{ВХ}}}{U_{\text{ВХ}}} \bigg/ \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВЫХ}}};$$

$$K_{\text{ст. } I} = \frac{\Delta U_{\text{ВХ}}}{U_{\text{ВХ}}} \bigg/ \frac{\Delta I_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{ВЫХ}}}, \text{ при } R_{\text{н}} = \text{const},$$

где $U_{\text{ВХ}}$, $U_{\text{ВЫХ}}$, $I_{\text{ВЫХ}}$ – номинальные напряжения на входе и выходе стабилизатора и номинальный ток нагрузки;

$\Delta U_{\text{ВХ}}$, $\Delta U_{\text{ВЫХ}}$, $\Delta I_{\text{ВЫХ}}$ – изменения напряжений на входе и выходе стабилизатора и изменение тока нагрузки.

Влияние нагрузки $R_{\text{н}}$ оценивается по внешним характеристикам $U_{\text{ВЫХ}}(I_{\text{ВЫХ}})$ и $I_{\text{ВЫХ}}(R_{\text{н}})$ или выходным (внутренним) сопротивлением стабилизатора

$$R_{\text{ВЫХ}} = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta I_{\text{ВЫХ}}}, \text{ при } U_{\text{ВХ}} = \text{const}.$$

Для стабилизатора напряжения $R_{\text{вых}} \ll R_{\text{н}}$, а для стабилизатора тока $R_{\text{вых}} \gg R_{\text{н}}$.

Применяют два типа стабилизаторов: параметрические и компенсационные.

В *параметрических стабилизаторах* используются элементы с нелинейной вольтамперной характеристикой (ВАХ), обеспечивающие постоянство напряжения, при значительных изменениях тока в стабилизаторах напряжения, и тока, при изменении напряжения в стабилизаторах тока. Такими элементами могут быть стабилитроны или транзисторы.

Компенсационные стабилизаторы напряжения имеют большие коэффициенты стабилизации и меньшее $R_{\text{вых}}$ при более высоком КПД. Структурная схема такого стабилизатора приведена на рис. 4.1. Стабилизатор состоит из источника эталонного напряжения 1, измерительного элемента 2 и регулирующего элемента 3.

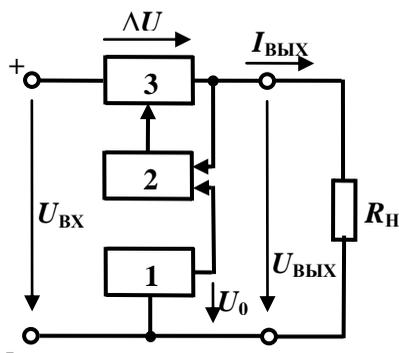


Рис. 4.1. Структурная схема стабилизатора:

1 – источник эталонного напряжения; 2 – измерительный элемент;

3 – регулирующий элемент

На входы измерительного элемента подаются эталонное напряжение U_0 и $U_{\text{вых}}$. Если $U_{\text{вых}}$ не равно U_0 , появляется сигнал рассогласования, который поступает на вход регулирующего элемента. Под действием этого сигнала падение напряжения на регулирующем элементе меняется таким образом, чтобы $U_{\text{вых}}$ оставалось постоянным:

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} - \Delta U = \text{const.}$$

В качестве источника эталонного напряжения чаще всего используется стабилитрон, а роль регулирующего элемента выполняет транзистор или составной транзистор. В большинстве современных стабилизаторов измерительный элемент выполняется на операционном усилителе.

В работе предлагается исследовать компенсационный стабилизатор на транзисторе, схема которого показана на рис. 4.2. В этой схеме в качестве регулирующего элемента использован транзистор VT_1 , измерительный элемент реализован на транзисторе VT_2 . Ток этого транзистора зависит от разности напряжений между базой и эмиттером. В качестве эталонного источника напряжения применен параметрический стабилизатор на резисторе R_2 и стабилитроне VD . Выходное напряжение поступает на базу транзистора VT_2 через делитель напряжения R_3, R_4 .

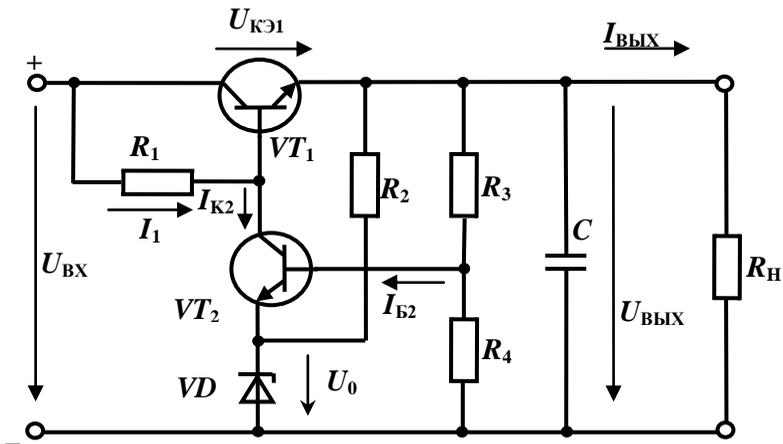


Рис. 4.2. Компенсационный стабилизатор напряжения:
 VT_1, VT_2 – транзисторы; R_2 – резистор;
 VD – стабилитрон; R_3, R_4 – делитель напряжения

Если напряжение на выходе стабилизатора по каким-либо причинам возросло, то возрастает напряжение $U_{бэ}$ транзистора VT_2 , что приводит к росту токов $I_{бэ}, I_{кэ}$. К коллектору VT_2 подключена база транзистора VT_1 , следовательно, изменение $I_{кэ}$ вызывает противо-

ложное изменение I_{B1} , т. к. $I_1 = \text{const}$. Снижение тока I_{B1} приведет к увеличению выходного сопротивления транзистора VT_2 , падение напряжение на транзисторе $U_{кэ1}$ возрастет, таким образом, $U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}} - U_{кэ1}$ остается практически неизменным. Основные параметры стабилизатора определяют:

$$K_{\text{ст.}U} = \frac{U_{\text{ВЫХ}} R_1 R_4}{U_{\text{ВХ}} (R_3 + R_4)} h_{21} / (h_{11} + R_1);$$

$$R_{\text{ВЫХ}} = \frac{h_{11} R_4}{h_{21} (R_3 + R_4)}.$$

Схема исследуемого стабилизатора тока показана на рис. 4.3. На базе транзистора VT поддерживается постоянный потенциал, задаваемый параметрическим стабилизатором на стабилитроне VD . Нагрузка R_H включена в коллекторную цепь транзистора VT , который включен по схеме с общей базой, где

$$I_k = \alpha I_3.$$

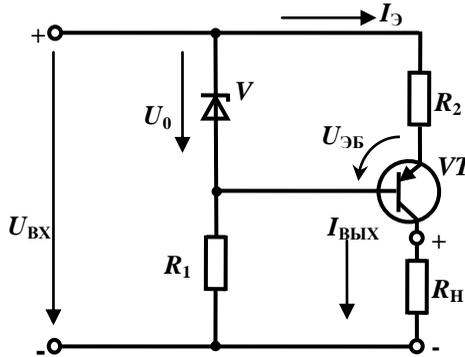


Рис.4.3. Компенсационный стабилизатор тока

Ток эмиттера I_3 определяется напряжением

$$U_{\text{ЭБ}} = U_0 - R_2 I_3.$$

Благодаря этому устанавливается режим работы

$$I_{\text{Э}} = (U_0 - U_{\text{ЭБ}}) / R_2 = \text{const.}$$

У современных транзисторов $\alpha \rightarrow 1$, таким образом, получается устройство, выходной ток которого

$$I_{\text{ВЫХ}} = I_{\text{К}} \approx I_{\text{Э}}$$

не зависит от $R_{\text{н}}$, а определяется только U_0 и R_2 . Режим стабилизации поддерживается до тех пор, пока транзистор VT работает в активном режиме, т. е.

$$U_{\text{ВХ}} > \Delta U + I_{\text{ВЫХ}} R_{\text{н}},$$

где ΔU – напряжение насыщения транзистора.

Отсюда максимальное значение сопротивления нагрузки, при котором сохраняется рабочий режим стабилизатора

$$R_{\text{н. max}} = \frac{U_{\text{ВХ}} - \Delta U}{I_{\text{ВЫХ}}}.$$

Коэффициент стабилизации тока

$$K_{\text{ст. I}} = I_{\text{ВЫХ}} / (U_{\text{ВХ}} h_{22}).$$

Выходное сопротивление стабилизатора

$$R_{\text{ВЫХ}} = \frac{h_{21} R_2}{h_{22} (r_{\text{д}} + h_{11})}.$$

Предварительное задание к эксперименту

1. Для компенсационного стабилизатора напряжения (рис. 4.2) рассчитать $K_{\text{ст}}$ и $R_{\text{ВЫХ}}$, если $R_1 = 6,8$ кОм; $R_3 = 1,2$ кОм; $R_4 = 6,8$ кОм; для транзистора $VT2$: $h_{11} = 1,2$ кОм; $h_{21} = 180$. Входное и выходное напряжения принять $U_{\text{ВХ}} = 22$ В; $U_{\text{ВЫХ}} = 12$ В.

2. Используя метод эквивалентного генератора, при $U_{\text{ВЫХ}}^{\text{XX}} = 12$ В и рассчитанном в п. 1 значении $R_{\text{ВЫХ}}$, определить изменение выходного напряжения, $\Delta U = I_{\text{н}} R_{\text{ВЫХ}}$, и выходное напряжение стабилизатора, $U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВЫХ}}^{\text{XX}} - \Delta U$, при заданном в табл. 4.1 токе нагрузки $I_{\text{н}}$.

3. Рассчитать $R_{\text{вых}}$ стабилизатора тока (рис. 4.3), если $R_2 = 180 \text{ Ом}$, дифференциальное сопротивление стабилитрона $r_d = 35 \text{ Ом}$. Транзистор VT имеет следующие параметры: $h_{11} = 50 \text{ Ом}$; $h_{22} = 1 \text{ мСм}$; $h_{21} = 30$.

4. Определить для стабилизатора тока максимально допустимое сопротивление нагрузки $R_{\text{н. макс}}$ при $U_{\text{вх}}$ и $I_{\text{вых}}$, заданных в табл. 4.1. Принять $\Delta U = 1 \text{ В}$.

Таблица 4.1

Варианты	1	2	3	4	5	6	7	8
$I_{\text{н}}$, мА	30	40	50	60	70	80	90	100
$U_{\text{вх}}$, В	23		24		25		26	
$I_{\text{вых}}$, мА	20				40			

Порядок выполнения эксперимента

1. Входное напряжение $U_{\text{вх}}$ на стабилизаторы подается от выпрямителя, который исследовался в лабораторной работе 3. $U_{\text{вх}}$ измеряется вольтметром $V1$.

2. Подготовить схему однофазного мостового выпрямителя с П-образным фильтром, поставив в нужное положение выключатели $B1$ – $B4$.

3. Подключить нагрузку $R_{\text{н}}$ к выходным клеммам стабилизатора напряжения и цифровые приборы для измерения тока нагрузки $I_{\text{н}}$ и выходного напряжения $U_{\text{вых}}$.

4. Включить стабилизатор напряжения и выпрямитель (стабилизатор тока должен быть выключен). При минимальном токе нагрузки снять зависимость $U_{\text{вых}}$ ($U_{\text{вх}}$) (табл. 4.2), изменяя $U_{\text{вх}}$ от 0 до максимального значения с помощью регулятора напряжения U_1 . Построить график зависимости и определить по нему $K_{\text{ст}}$. Сравнить значение $K_{\text{ст}}$ с рассчитанным по п. 1 предварительного задания.

Таблица 4.2

$U_{\text{вх}}$, В	0					
$U_{\text{вых}}$, В						

5. Установить максимальное входное напряжение $U_{вх}$. Изменяя сопротивление нагрузки во всем диапазоне, снять зависимость $U_{вых}(I_{н})$ (табл. 4.3). Построить выходную характеристику стабилизатора и определить по ней $R_{вых}$. Сравнить с результатами расчетов по п. 2 предварительного задания.

Таблица 4.3

$I_{н}, \text{мА}$						
$U_{вых}, \text{В}$						

6. Отключить выпрямитель и стабилизатор напряжения. Подключить нагрузку к выходу стабилизатора тока.

7. Включить стабилизатор тока и выпрямитель. Установить с помощью регулятора U_1 максимальное входное напряжение. Изменяя $R_{н}$ во всем диапазоне, снять зависимость $I_{вых}(U_{вых})$. По полученным результатам рассчитать для каждого измерения $R_{н}$ и построить $I_{вых}(R_{н})$. Определить $R_{н, \max}$ и $R_{вых}$ стабилизатора. Сравнить с результатами расчетов предварительного задания (табл. 4.4).

Таблица 4.4

$I_{вых}, \text{мА}$						
$U_{вых}, \text{В}$						
$R_{вых}, \text{Ом}$						

8. Установить минимальное сопротивление нагрузки $R_{н}$ (минимальное $U_{вых}$). Изменяя $U_{вх}$ от 0 до максимального значения, снять зависимость $I_{вых}(U_{вх})$ (табл. 4.5). Построить график $I_{вых}(U_{вх})$ и определить $K_{ст}$. Сравнить с результатами расчетов предварительного задания.

Таблица 4.5

$U_{вх}, \text{В}$						
$I_{вых}, \text{мА}$						

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Полные схемы компенсационного стабилизатора напряжения и стабилизатора тока с обозначением всех элементов, указанием токов, напряжений.
3. Результаты расчета предварительного задания.
4. Результаты эксперимента в виде таблиц и графиков.
5. Результаты расчетов $K_{ст}$, $R_{вых}$ по графикам.
6. Сравнительный анализ результатов.

Контрольные вопросы

1. Каково назначение электронных стабилизаторов?
2. Как устроен и как работает параметрический стабилизатор напряжения и тока?
3. Поясните назначение элементов схемы компенсационного стабилизатора напряжения.
4. От каких элементов зависит коэффициент стабилизации?
5. Как можно осуществить регулирование $U_{вых}$ стабилизатора напряжения?
6. Поясните принцип действия стабилизатора тока.
7. Как можно изменить выходной ток стабилизатора?
8. Почему стабилизатор тока может работать только на нагрузку с R меньше $R_{н. max}$?
9. Почему стабилизатор тока и стабилизатор напряжения имеют разные выходные сопротивления?

Лабораторная работа № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ

Цель работы: изучение основных характеристик операционного усилителя (ОУ); исследование типовых аналоговых и импульсных устройств на базе ОУ.

Общие сведения

Операционные усилители являются разновидностью усилителей постоянного тока, имеют большой коэффициент усиления по напряжению

$$k_u = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = (5 \cdot 10^3) - (5 \cdot 10^6)$$

и высокое входное сопротивление

$$R_{\text{вх}} = (20 \text{ кОм}) - (100 \text{ МОм}).$$

Современные ОУ выполняются многокаскадными и включают в себя ряд дополнительных устройств (защиту, термокомпенсацию и др.). Массовое применение ОУ обусловлено их универсальностью: устройства на их базе могут осуществлять усиление, выполнять математические операции, сравнивать электрические величины, генерировать сигналы различной формы.

В данной работе использована микросхема К544УД1А, которая представляет собой операционный усилитель общего назначения с высоким входным сопротивлением. На рис. 5.1 приведены условные обозначения и типовая схема включения ОУ. Он имеет два входа и один выход. При подаче сигнала на инвертирующий вход $U_{\text{вх}}$ и приращение выходного сигнала $U_{\text{вых}}$ находится в противофазе (противоположное по знаку) с приращением $U_{\text{вх}}$, а при подаче на неинвертирующий вход – совпадают по фазе (одинаковы по знаку). В зависимости от конкретного устройства на базе ОУ используют как инвертирующий, так и неинвертирующий вход.

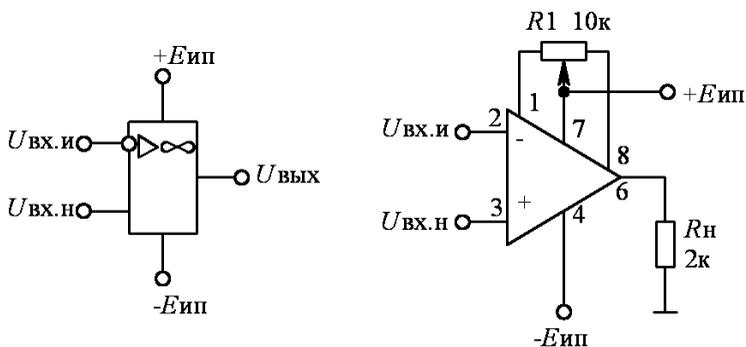


Рис. 5.1. Условные обозначения и типовая схема включения ОУ

На рис. 5.2 приведена принципиальная схема ОУ К544УД1А.

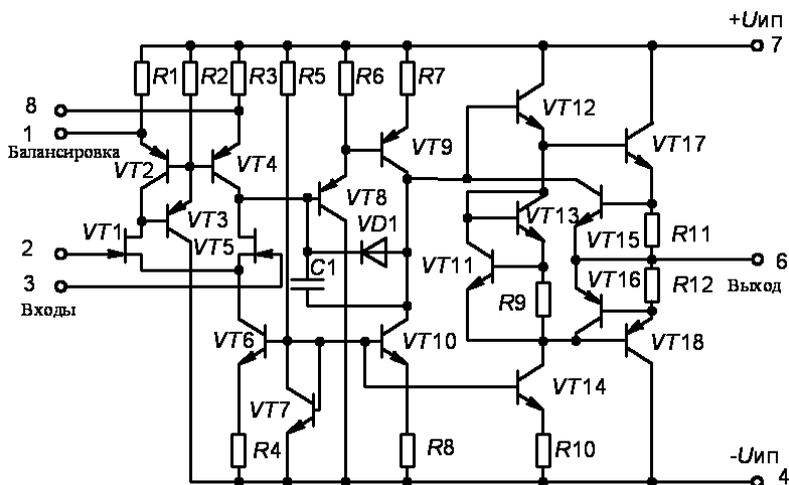


Рис. 5.2. Принципиальная схема ОУ К544УД1А

Высокое входное сопротивление ОУ обеспечивается согласованной парой полевых транзисторов VT_1 , VT_5 входного дифференциального каскада. Для получения большого коэффициента усиления входного каскада в цепь их стоков включены транзисторы VT_2 – VT_4 и резисторы R_1 , R_3 , включенные как генераторы тока, которые образуют трансформатор тока. Суммарный ток стоков полевых транзисторов VT_1 , VT_5 обеспечивается стабилизатором тока, включаю-

щим транзисторы VT_6 , VT_7 и резисторы R_4 , R_5 . Транзистор VT_7 служит источником опорного напряжения. Он работает как стабилитрон, работающий на прямой ветви p - n -перехода. При изменении температуры корпуса микросхемы напряжение между базой и эмиттером транзисторов VT_6 , VT_7 , VT_{10} , VT_{14} изменяется одновременно в одну или другую сторону. Этим достигается температурная стабилизация токов покоя стабилизаторов тока на транзисторах VT_6 , VT_{10} и VT_{14} . Начальный ток покоя этих стабилизаторов задан номинальными значениями резисторов в цепи их эмиттеров, т. е. резисторами R_4 , R_8 , R_{10} . Ток через транзисторы VT_2 и VT_4 можно менять внешним резистором, подключенным к выводам 1 и 8, что позволяет устанавливать на выходе ОУ нулевое постоянное напряжение. Выходной сигнал первого каскада подается через эмиттерный повторитель (VT_8) на второй усилительный каскад на транзисторе VT_9 , в коллекторной цепи которого включен генератор тока на транзисторе VT_{10} . С коллектора транзистора VT_9 сигнал снимается на эмиттерный повторитель на транзисторе VT_{12} . Нагрузкой этого повторителя является стабилизатор тока на транзисторе VT_{14} . На транзисторах VT_{11} и VT_{13} с резистором R_9 образуется падение напряжения, необходимое для открывания транзисторов VT_{17} и VT_{18} выходного каскада. Для защиты выхода ОУ от короткого замыкания подключены транзисторы VT_{15} и VT_{16} , которые открываются при большом выходном токе и шунтируют выходное напряжение с транзисторов VT_9 и VT_{14} . Ток защиты задается величиной сопротивлений резисторов R_{11} и R_{12} .

Важнейшими характеристиками ОУ являются амплитудные (передаточные) $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$ (рис. 5.3) и амплитудно-частотные (АЧХ) $k_u(f)$. Последние имеют вид АЧХ усилителя постоянного тока за исключением специальных частотно-зависимых устройств (избирательный усилитель и др.). Передаточные характеристики имеют линейный участок, для которого $k_u = \frac{U_{\text{ВВХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \text{const}$, и нелинейный — $k'_u < k_u$. При реализации конкретных устройств используют линейные и нелинейные участки. Рассмотрим примеры построения устройств на базе ОУ.

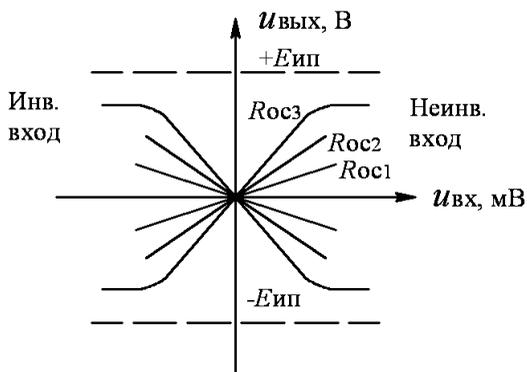


Рис. 5.3. Амплитудные характеристики ОУ

5.1. Аналоговые схемы, работающие на линейных участках амплитудных характеристик

Инвертирующий усилитель (рис. 5.4) изменяет знак выходного сигнала относительно входного. На инвертирующий вход через резистор R_1 подается $U_{вх}$ и вводится параллельная отрицательная обратная связь по напряжению с помощью резистора R_{oc} . Коэффициент усиления

$$k_{UИ} = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} = -\frac{R_{oc}}{R_1}.$$

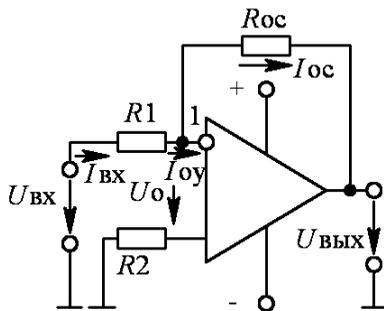


Рис. 5.4. Инвертирующий усилитель

Для уменьшения погрешностей от изменения входных токов делают симметричные входы, выбирая

$$R_2 = R_1 \parallel R_{oc}.$$

Неинвертирующий усилитель (рис. 5.5) не изменяет знак выходного сигнала относительно входного

$$k_{UH} = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} = 1 + \frac{R_{oc}}{R_1}.$$

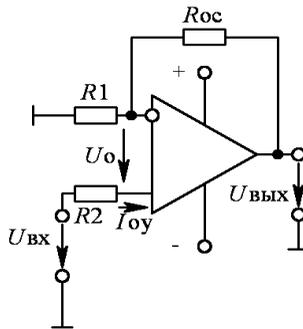


Рис. 5.5. Неинвертирующий усилитель

Вычитатель-усилитель (рис. 5.6) предназначен для усиления разностных сигналов. Если $R_1 = R_2$ и $R_{oc} = R$, то $U_{ВЫХ} = (U_{ВХ2} - U_{ВХ1}) \frac{R_{oc}}{R_1}$.

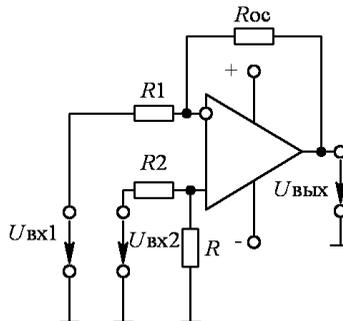


Рис. 5.6. Вычитатель-усилитель

Сумматоры. Схемы инвертирующего и неинвертирующего сумматоров приведены на рис. 5.7, 5.8.

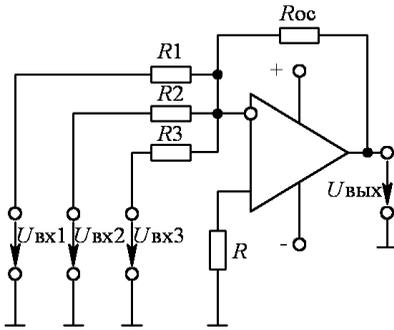


Рис. 5.7. Инвертирующий сумматор

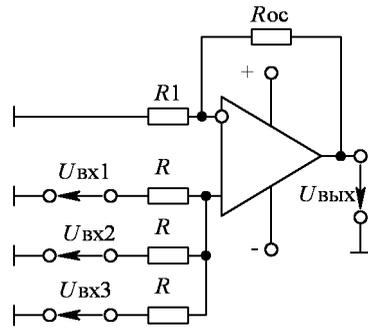


Рис. 5.8. Неинвертирующий сумматор

При равенстве входных сопротивлений $R_1 = R_2 = R$.

Приращение выходного сигнала:

– для инвертирующего сумматора:

$$U_{\text{ВЫХ}} = -\frac{R_{\text{OC}}}{R} (U_{\text{ВХ1}} + U_{\text{ВХ2}} + \dots + U_{\text{ВХn}});$$

– для неинвертирующего сумматора:

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{1 + R_{\text{OC}} / R}{n} (U_{\text{ВХ1}} + U_{\text{ВХ2}} + \dots + U_{\text{ВХn}}).$$

В схеме сумматоров переменным параметром является сопротивление обратной связи R_{OC} , которое и определяет коэффициент усиления. Формулы приведены для постоянных величин (числовой сумматор) $U_{\text{ВХ1}}$, $U_{\text{ВХ2}}$ и т. д. В работе исследуется также инвертирующий геометрический сумматор, для которого складываются мгновенные значения $U_{\text{ВХ1}}$ и $U_{\text{ВХ2}}$.

Интегратор, схема которого показана на рис. 5.9, реализует операцию

$$u_{\text{ВЫХ}} = -\frac{1}{R_1 C_{\text{OC}}} \int_0^t u_{\text{ВХ}} dt = -\frac{1}{\tau_0} \int_0^t u_{\text{ВХ}} dt,$$

где $\tau = R_1 C_{\text{OC}}$ – постоянная времени.

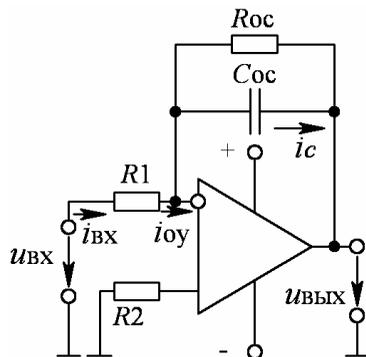


Рис. 5.9. Интегратор

Дифференциатор (рис. 5.10) выполняет операцию

$$u_{\text{ВЫХ}} = -R_{\text{oc}} C \frac{du_{\text{ВХ}}}{dt} = -\tau \frac{du_{\text{ВХ}}}{dt}.$$

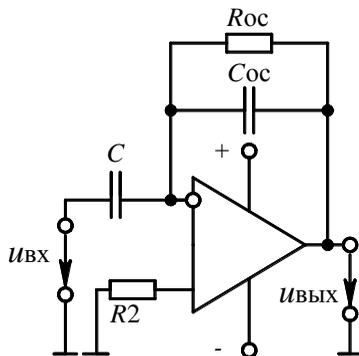


Рис. 5.10. Дифференциатор

Для интегратора и дифференциатора на инвертирующий вход подаются прямоугольные импульсы с выхода симметричного мультивибратора. На рис. 5.11, а, приведен электрический аналог и на рис. 5.11, б, – временные диаграммы, поясняющие принцип инвертирующего дифференцирования и интегрирования в электрических и электронных цепях.

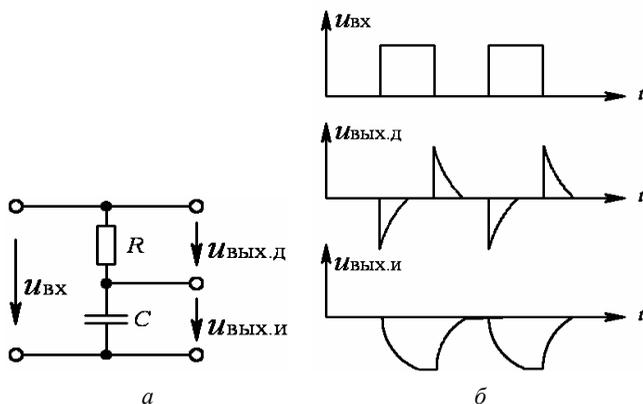


Рис. 5.11. Электрический аналог дифференциатора и интегратора (а) и диаграммы на входе и выходе этих устройств (б)

Линейные усилители представлены инвертирующим усилителем (рис. 5.12), для которого

$$U_{\text{ВЫХ}} = -\frac{R_{\text{ОС}}}{R_1} U_{\text{ВХ}},$$

и избирательным усилителем (рис. 5.13) с частотно-зависимым двойным Т-образным мостом на базе резисторов R_1, R_2, R_3 и конденсаторов C_1, C_2, C_3 , подключенным по схеме отрицательной обратной связи, для которого

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}.$$

Мост выполняется симметричным, т. е.

$$R_1 = R_2 = R; \quad C_1 = C_2 = C;$$

$$R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = 0,5R.$$

Если

$$C_3 = C_1 + C_2 = 2C,$$

тогда

$$\omega_0 = \frac{1}{R_1 C_1} = \frac{1}{R_2 C_2} = \frac{1}{R_3 C_3} = \frac{1}{RC}.$$

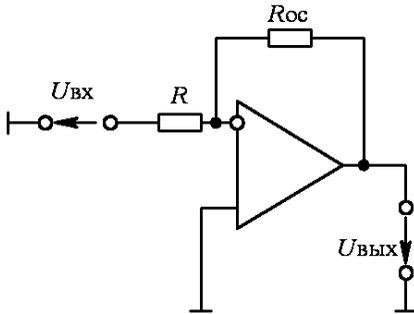


Рис. 5.12. Линейный усилитель

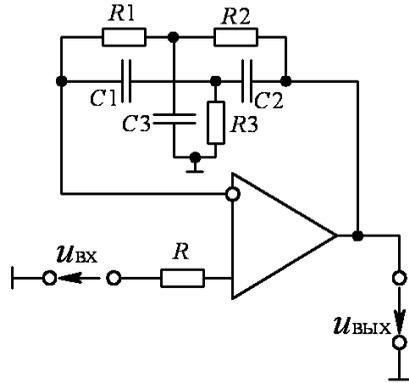


Рис. 5.13. Избирательный усилитель

5.2. Генераторы

Мультивибратором называется генератор периодически повторяющихся импульсов прямоугольной формы. Мультивибратор (рис. 5.14) является автогенератором и работает без подачи входного сигнала. Рассматриваемый генератор является симметричным, и для него длительности импульса и паузы равны:

$$t_{и} = t_{п} = R_{oc} C \ln \left(1 + \frac{2R_2}{R_1} \right),$$

при $R_1 = R_2$

$$t_{и} = t_{п} = R_{oc} C \ln 3,$$

период повторения импульсов

$$T_{п} = (t_{и} + t_{п}) = 2t_{и},$$

СКВАЖНОСТЬ

$$Q = \frac{T_{\Pi}}{t_{и}} = 2.$$

Изменяя $\tau = R_{oc}C$ и величины R_1, R_2 , можно регулировать длительность, частоту и амплитуду импульсов.

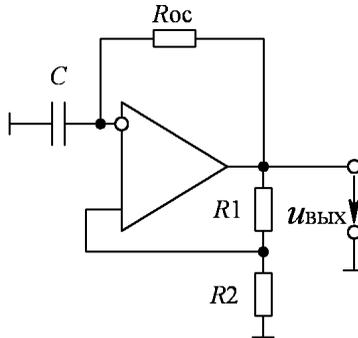


Рис. 5.14. Мультивибратор

Генератор гармонических колебаний с мостом Вина на базе ОУ (рис. 5.15) является самовозбуждающимся устройством. Мост Вина, состоящий из элементов R_1, R_2, C_1, C_2 , образует звено частотно-зависимой положительной обратной связи, для которого

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1R_2C_1C_2}},$$

где f_0 – частота генерации частотно-зависимой цепи.

При $R_1 = R_2 = R$ и $C_1 = C_2 = C$ (условие обязательное)

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}.$$

Соотношение параметров R_{oc} и R_0 определяет коэффициент усиления k_u .

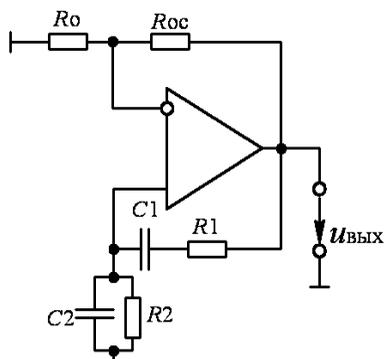


Рис. 5.15. Генератор с мостом Вина

Генератор линейно изменяющегося напряжения (ГЛИН) предназначен для получения напряжения, которое в течение некоторого времени нарастает или спадает по линейному или близкому к линейному закону и используется в каскадах сравнения, схемах временной задержки импульсов, для получения временных разверток в электронно-лучевых трубках и т. д. Реализация ГЛИН на ОУ и временные диаграммы входного и выходного напряжений даны на рис. 5.16. Принцип работы основан на применении зарядного или разрядного устройства, интегрирующего конденсатора C и электронного ключа на транзисторе VT . При закрытом состоянии ключа происходит заряд конденсатора C от $E_{зар}$ через R_3 с постоянной времени $\tau_{зар} = R_3C$, что определяет длительность прямого (рабочего) хода. Замыкание ключа приводит к быстрой разрядке конденсатора, и время обратного хода определяется сопротивлением насыщенного транзистора. Выходное напряжение повторяет форму напряжения на конденсаторе C и имеет вид «пилы».

Пороговые устройства предназначены для сравнения двух входных величин. В рассматриваемых схемах сравниваются постоянное $U_{оп}$ и переменное $u_{вх}$ напряжения. На рис. 5.17, *a*, приведен *двухходовый компаратор*, у которого сравнивающиеся сигналы поступают на оба входа усилителя. Поэтому состояние выхода компаратора (полярность выходного напряжения) определяется большим по уровню напряжением одного из входов, что отражает идеализированная (без учета гистерезиса) передаточная характеристика

(рис. 5.17, б). При равенстве входных напряжений выходное напряжение равно нулю. При

$$\Delta U_{\text{вх}} = U_{\text{оп}} - U_{\text{вх}} > 0$$

напряжение на выходе ОУ будет

$$u_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВЫХ. м}},$$

если же

$$\Delta U_{\text{вх}} = U_{\text{оп}} - U_{\text{вх}} < 0,$$

то

$$u_{\text{ВЫХ}} = -U_{\text{ВЫХ. м}}$$

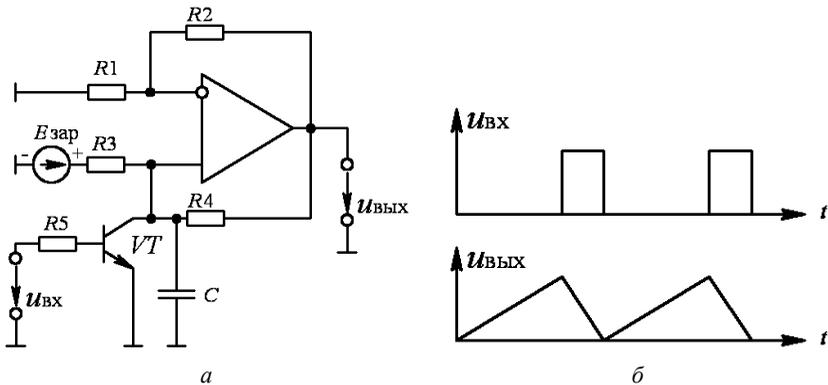


Рис. 5.16. Генератор пилообразного напряжения:

а – электрическая схема; *б* – диаграммы входных и выходных напряжений

Уровень входного напряжения компаратора ограничивается допустимым синфазным входным напряжением. Принцип работы устройства поясняется временными диаграммами для $u_{\text{вх}}$ и $u_{\text{вых}}$ (рис. 5.17, в). Обратные связи для этого компаратора не предусмотрены ни по одному из входов.

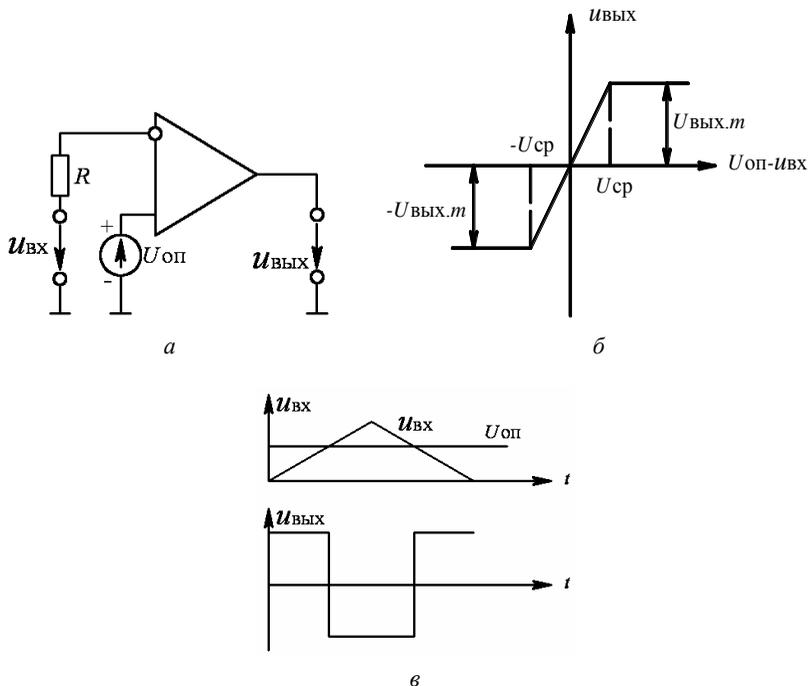


Рис. 5.17. Двухвходовый компаратор:
 а – электрическая схема; б – передаточная характеристика;
 в – временными диаграммами для $u_{вх}$ и $u_{вых}$

Для ускорения процесса переключения используют ускоряющие цепи на основе введения положительных обратных связей (ПОС). Такой компаратор с ПОС называется *триггером Шмитта* (рис. 5.18, а). Здесь применяется ПОС через цепочку R_1, R_2 , а входной сигнал подается на инвертирующий вход.

На рис. 5.18, б, построена передаточная характеристика этого компаратора, для которой

$$U'_{пр} = U_{оп} \frac{R_2}{R_1 + R_2} + U_{вых. м} \frac{R_1}{R_1 + R_2};$$

$$U''_{пр} = U_{оп} \frac{R_2}{R_1 + R_2} - U_{вых. м} \frac{R_1}{R_1 + R_2};$$

$$U_{\Gamma} = U'_{\text{пр}} - U''_{\text{пр}} = 2U_{\text{вых. м}} \frac{R_1}{R_1 + R_2},$$

где U_{Γ} – ширина петли, определяемая соотношением сопротивлений делителя R_1 и R_2 .

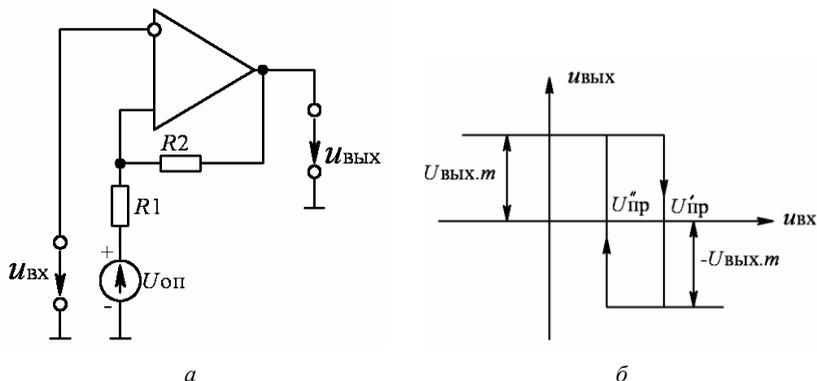


Рис. 5.18. Триггер Шмитта:
а – электрическая схема; *б* – передаточная характеристика

Предварительное задание к эксперименту

1. Для инвертирующего усилителя (см. рис. 5.4), при $R_1 = 10$ кОм и $R_{oc} = 20, 100$ и 270 кОм, рассчитать и построить амплитудную характеристику при изменении $U_{вх}$ от 0 до 1000 мВ и ограничении $U_{вых} = 12$ В.

2. Рассчитать $U_{вых}$ вычитателя-усилителя (см. рис. 5.6), с $R_1 = R_2 = R = 10$ кОм и $R_{oc} = 10$ и 20 кОм, при трех значениях $U_{вх1}$ и $U_{вх2}$ в пределах ± 1000 мВ. Результат внести в табл. 5.2.

3. Рассчитать $U_{вых}$ инвертирующего сумматора (см. рис. 5.7), с $R_1 = R_2 = R = 10$ кОм и $R_{oc} = 20, 50, 100$ кОм, при трех различных наборах $U_{вх1}$ и $U_{вх2}$ в пределах ± 1000 мВ. Результат внести в табл. 5.2.

4. Определить постоянную времени τ для интегратора ($R_1 = 10$ кОм; $C_{oc} = 5$ и 10 нФ) и дифференциатора ($R_{oc} = 10$ и 50 кОм, $C = 10$ и 5 нФ).

5. Рассчитать резонансную частоту f_0 и период T_0 избирательного усилителя (см. рис. 5.13), при $R = 24$ кОм и $C = 1,1$ нФ.

6. Рассчитать длительности импульсов $t_{и}$ и пауз $t_{п}$, а также период повторения импульсов $T_{п}$ выходного напряжения мультивибратора (см. рис. 5.14), при $C = 6,8$ нФ и $R_{ос} = 16$ кОм.

7. Определить частоту и период выходного напряжения генератора гармонических колебаний (см. рис. 5.15), при $R = 24$ кОм и $C = 1,1$ нФ.

Примечание: объем предварительного задания может быть уменьшен по указанию преподавателя.

Порядок выполнения эксперимента

1. При включенном стенде и отсутствии входного напряжения произвести балансировку усилителя потенциометром («установка 0»).

2. Для инвертирующего (см. рис. 5.4) или неинвертирующего (см. рис. 5.5) усилителя снять амплитудные характеристики для заданных в предварительном задании значений $R_{ос}$. Входное напряжение снимается с источников опорного напряжения с полярностью «+» и «-», устанавливаемой переключателями Π_1 и Π_2 . Уровень входного напряжения меняется в диапазоне от 0 до 1000 мВ. Результаты измерений занести в табл. 5.1.

Таблица 5.1

$U_{вх}$, мВ	0						1000
$U'_{вых}$, В, при $R_{ос} = 20$ кОм	0						
$U''_{вых}$, В, при $R_{ос} = 100$ кОм	0						
$U'''_{вых}$, В, при $R_{ос} = 270$ кОм	0						

По результатам измерений построить амплитудные характеристики. Недостающие характеристики в трех четвертях системы координат строятся по зеркальному отображению по отношению к снятым (табл. 5.1). На построенных характеристиках нанести точки по предварительному расчету.

3. Собрать цепь вычитателя-усилителя, согласно рис. 5.6, и подать на входы от источников постоянного тока напряжения, раз-

личные по уровню и знаку при различных значениях R_{oc} . Значения входных и выходного напряжений занести в табл. 5.2.

4.1. Для инвертирующего (см. рис. 5.7) или неинвертирующего (см. рис. 5.8) сумматора при двух источниках входных напряжений произвести измерения входных и выходного напряжений для различных по знаку и величине входных напряжений при двух значениях R_{oc} . По пп. 3, 4 уровень входных напряжений брать в пределах ± 1 В. Результаты измерений занести в табл. 5.2.

Таблица 5.2

	$U_{вх1}$, мВ	$U_{вх2}$, мВ	$U_{вых}$, мВ	R_{oc} , кОм	$U_{вых, расч}$, мВ
Вычитатель				10	
				10	
				20	
Сумматор				10	
				10	
				20	

4.2. В геометрическом неинвертирующем сумматоре на входы подаются переменные напряжения: первое – с выхода симметричного мультивибратора стенда (включить источник питания 5В стенда), второе – с генератора низкочастотных сигналов (синусоидальный выход). Ослабление – 20. Частота 3–6 кГц. R_{oc} сумматора 10 или 20 кОм. Снять осциллограммы входных $u_{вх}(t)$ и выходного $u_{вых}(t)$ напряжений, по которым определить параметры входных сигналов (амплитуду, частоту, период). Произвести графическое сложение входных сигналов с коэффициентом усиления $k_u = 2$.

5. По рис. 5.9 и 5.10 на входы дифференциатора и интегратора подаются прямоугольные импульсы с выхода симметричного мультивибратора стенда. Снять осциллограммы и определить параметры входных $u_{вх}(t)$ импульсов (амплитуда, период, частота), а также снять осциллограммы выходных напряжений $u_{вых}(t)$ при следующих номинальных данных устройств: для дифференциатора – $C_{вх} = 10$ и 5 нФ, $R_{oc} = 20$ и 30 кОм, $C_{oc} = 2$ нФ; для интегратора – $R_{вх} = 10$ кОм, $C_{oc} = 10$ и 5 нФ, $R_{oc} = 20$ кОм. По снятым осциллограммам определить графическим способом постоянную времени τ и сравнить с результатами предварительного расчета.

6. Собрать схему линейного усилителя, согласно рис. 5.12, с подключением на вход генератора низкочастотных колебаний (синусоидальный выход). Снять амплитудную характеристику на частоте 1 кГц в линейном режиме, который контролируется осциллографом на выходе усилителя, для значений $R_{oc} = 91$ и 270 кОм. Результаты эксперимента свести в табл. 5.3.

Таблица 5.3

$R_{oc} = 91$ кОм	$U_{вх},$ мВ							
	$U_{вых},$ В							
$R_{oc} = 270$ кОм	$U_{вх},$ мВ							
	$U_{вых},$ В							

По результатам измерений построить амплитудную характеристику $U_{вых} = f(U_{вх})$.

7. По рис. 5.13 собрать схему избирательного усилителя. На вход подключается низкочастотный генератор сигналов на синусоидальном выходе с уровнем выходного напряжения 90 мВ (входное для усилителя). Снять амплитудно-частотную характеристику $k_u(f)$ в диапазоне частот 4,5–7,5 кГц. Результаты эксперимента занести в табл. 5.4.

Таблица 5.4

$f,$ кГц							
$U_{вых},$ В							
k_u							

По результатам табл. 5.4 построить АЧХ, определить резонансную частоту, которую сравнить с результатами предварительного расчета. По АЧХ определить f_n, f_b , полосу пропускания.

8. Согласно рис. 5.14 и 5.15, при включенном питании стенда снять осциллограммы выходных напряжений $u_{вых}(t)$ мультивибратора и генератора гармонических колебаний, по которым определить параметры сигналов: амплитуду, частоту, период. Результаты эксперимента сравнить с результатами предварительного расчета.

9. На вход генератора линейно изменяющегося напряжения (ГЛИН) по схеме (см. рис. 5.15) подать $u_{вх}$ от несимметричного

мультивибратора. По осциллограммам $u_{вх}(t)$ и $u_{вых}(t)$ определить: для $u_{вх}$ – частоту, коэффициент заполнения, скважность импульсов; для $u_{вых}$ – амплитуду, длительность прямого (рабочего) хода, длительность обратного хода.

10. На вход компаратора (см. рис. 5.17) подать синусоидальное напряжение от генератора сигналов при ослаблении «0». Снять осциллограммы входного $u_{вх}(t)$ и выходного $u_{вых}(t)$ напряжений.

11. Для триггера Шмитта (см. рис. 5.18) при подаче на вход напряжения (по п. 10) снять передаточную характеристику $u_{вых}(u_{вх})$ устройства.

Примечание: пп. 4.2, 5, 9, 10, 11 выполнять, используя оба канала осциллографа (канал А – вход, канал Б – выход). **Внимание!** Перед включением осциллографа в схему обязательно проверьте положение входа « \perp » (общая точка схемы).

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Рабочие схемы исследуемых устройств.
3. Результаты предварительного расчета.
4. Характеристики, осциллограммы исследуемых устройств.
5. Таблицы измерений.

Контрольные вопросы

1. К какому классу усилителей относится ОУ?
2. Чем объясняется широкое использование ОУ?
3. Поясните структурную компоновку ОУ.
4. Что такое обратные связи в усилителях и как они используются при построении конкретных устройств на базе ОУ?
5. Какие основные характеристики ОУ и какой они имеют вид?
6. Где используют линейный и нелинейный режимы усиления?
7. Поясните принцип построения инвертирующего и неинвертирующего усилителя на базе ОУ.
8. Как определяется их коэффициент усиления?
9. Поясните принцип построения вычитателя, сумматора, дифференциатора, интегратора. Запишите формулы выполняемых операций.

10. Что такое «избирательный усилитель»? Особенности АЧХ. Что такое полоса пропускания, как она определяется?

11. Основные принципы построения самовозбуждающихся устройств на базе ОУ.

12. Что такое частотно-зависимые цепи и в каких устройствах они используются?

13. Принцип построения и использование ГЛИН.

14. Что такое «пороговые устройства»?

15. Какое принципиальное отличие при построении компаратора и триггера Шмитта на ОУ?

16. Что такое «гистерезис» в электронных цепях?

Лабораторная работа № 6

ЛОГИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ И МИКРОСХЕМЫ

Цель работы: изучение принципов построения серийных логических микросхем; исследование логических функций одной и двух переменных и их реализация; построение простых устройств автоматики на базе логических и цифроимпульсных устройств.

Общие сведения

Логические элементы (ЛЭ) широко применяются в автоматике, вычислительной технике и цифровых измерительных приборах. Их создают на базе электронных устройств, работающих в ключевом режиме, при котором уровни сигналов могут принимать только два значения. В положительной логике принято, что высокий уровень сигнала соответствует логической единице (1), а низкий – логическому нулю (0).

Все логические устройства можно разделить на две группы:

1) *комбинационные*, в которых выходные сигналы в данный момент однозначно определяются входными;

2) *последовательностные*, в которых выходные сигналы зависят не только от входных, но и от предыдущего состояния устройства.

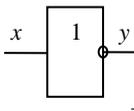
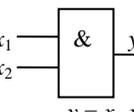
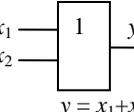
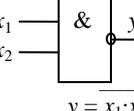
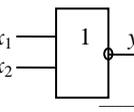
Логическая функция выражает зависимость выходных логических переменных от входных и принимает значение 0 или 1. Любую логическую функцию удобно представить в виде таблицы состояний (таблицы истинности), где записываются возможные комбинации аргументов и соответствующие им функции.

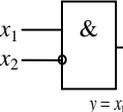
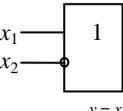
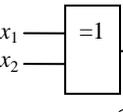
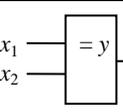
В общем случае число элементарных логических функций от n переменных равно 2^{2^n} . Так, при одной переменной возможны четыре функции (табл. 6.1). Здесь единичная и нулевая функции не зависят от значения аргумента и являются постоянными. Двум переменным соответствует 16 функций: $2^{2^2} = 16$. В табл. 6.2 приведены основные логические функции двух переменных.

Таблица 6.1

Название функции	Обозначение функции	Значение x	
		0	1
Нулевая	y_0	0	0
Повторение	y_1	0	1
Инверсия	y_2	1	0
Единичная	y_3	1	1

Таблица 6.2

Тип элемента	Логическая функция (операция)	Обозначение логической операции	Таблица истинности					Условное изображение
			x_1	0	0	1	1	
			x_2	0	1	0	1	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Элемент НЕ (инвертор)	Логическое отрицание, инверсия	\bar{x} $\neg x$	x	0	1			 $y = \bar{x}$
			\bar{x}	1	0			
Элемент И (конъюнктор)	Логическое умножение, конъюнкция	$x_1 \cdot x_2$ $x_1 x_2$ $x_1 \wedge x_2$ $x_1 \& x_2$	$x_1 \cdot x_2$	0	0	0	1	 $y = x_1 \cdot x_2$
Элемент ИЛИ (дизъюнктор)	Логическое сложение, дизъюнкция	$x_1 + x_2$ $x_1 \vee x_2$	$x_1 + x_2$	0	1	1	1	 $y = x_1 + x_2$
Элемент И-НЕ (элемент Шеффера)	Штрих Шеффера, отрицание конъюнкции	$\overline{x_1 \cdot x_2}$ $x_1 x_2$	$\overline{x_1 \cdot x_2}$	1	1	1	0	 $y = \overline{x_1 \cdot x_2}$
Элемент ИЛИ-НЕ (элемент Пирса)	Стрелка Пирса, функция Вебба, отрицание дизъюнкции	$\overline{x_1 + x_2}$ $x_1 \downarrow x_2$	$\overline{x_1 + x_2}$	1	0	0	0	 $y = \overline{x_1 + x_2}$

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Запрет x_2	Запрет	$\overline{x_1 \cdot x_2}$	$\overline{x_1 \cdot x_2}$	0	0	1	0	 $y = x_1 \cdot \bar{x}_2$
Импликация от x_2 к x_1	Импликация	$\overline{x_1 + x_2}$	$\overline{x_1 + x_2}$	1	0	1	1	 $y = x_1 \cdot \bar{x}_2$
Исключающее ИЛИ (неравнозначность, сложение по модулю 2)	Исключающее ИЛИ	$x_1 \oplus x_2$ $\overline{x_1 x_2} + \overline{x_1 \bar{x}_2}$	$x_1 \oplus x_2$	0	1	1	0	 $y = x_1 \oplus x_2$
Равнозначность (эквивалентность)	Равнозначность	$x_1 \sim x_2$ $x_1 x_2 + \bar{x}_1 \bar{x}_2$	$x_1 \sim x_2$	1	0	0	1	 $y = x_1 \sim x_2$

Работу логических устройств анализируют с помощью алгебры логики (булевой алгебры), где переменная может принимать только два значения: 0 или 1.

Основными логическими операциями являются (табл. 6.2):

1) логическое умножение: $y = x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_n$ (читается «и x_1 , и x_2 , ..., и x_n »);

2) логическое сложение: $y = x_1 + x_2 + \dots + x_n$ (читается «или x_1 , или x_2 , ..., или x_n »);

3) логическое отрицание: $y = \bar{x}$ (читается «не x »).

Как видно из табл. 6.2, выходной сигнал y элемента ИЛИ равен 1, если хотя бы на один из его входов подан сигнал 1. Элемент И выдает 1, если на все входы поданы сигналы 1.

Все возможные логические функции n переменных можно образовать с помощью комбинации трех основных операций: И, ИЛИ, НЕ. Поэтому такой набор называют логическим базисом, или функционально полным. Используя законы булевой алгебры (табл. 6.3), можно доказать, что таковыми являются наборы из одной функции И-НЕ, ИЛИ-НЕ.

Таблица 6.3

Аксиомы (тождества)	$1 + x = 1$ $0 + x = x$ $x + x = x$ $x + \bar{x} = 1$ $\overline{\bar{x}} = x$	$0 \cdot x = 0$ $1 \cdot x = x$ $x \cdot x = x$ $x \cdot \bar{x} = 0$
Законы коммутативности	$x_1 + x_2 = x_2 + x_1$	$x_1 \cdot x_2 = x_2 \cdot x_1$
Законы ассоциативности	$x_1 + x_2 + x_3 = x_1 + (x_2 + x_3)$ $x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 = x_1 \cdot (x_2 \cdot x_3)$	
Законы дистрибутивности	$x_1 \cdot (x_2 + x_3) = (x_1 \cdot x_2) + (x_1 \cdot x_3)$ $x_1 + (x_2 \cdot x_3) = (x_1 + x_2) \cdot (x_1 + x_3)$	
Законы дуальности (теоремы де Моргана)	$\overline{x_1 + x_2} = \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2$	$\overline{x_1 \cdot x_2} = \bar{x}_1 + \bar{x}_2$
Законы поглощения	$x_1 + x_1 \cdot x_2 = x_1$	$x_1 \cdot (x_1 + x_2) = x_1$

В базовых элементах одной серии использована одинаковая микросхемная реализация. Серия характеризуется общими электрическими, конструктивными и технологическими параметрами.

Интегральные микросхемы серии 155 представляют собой транзисторно-транзисторные логические (ТТЛ) элементы с 14 или 16 выводами. Базовым элементом серии является логический элемент И-НЕ, состоящий из многоэмиттерного транзистора VT1 и сложного усилителя-инвертора (рис. 6.1).

Если на входы ЛЭ поданы высокие положительные потенциалы, $U_{\text{вх}}^1 \geq 2,4$ В, то переходы база–эмиттер VT1 закрываются, а через его открытый переход база–коллектор и резистор R1 протекает ток базы транзистора VT2, достаточный для его насыщения. При этом ток эмиттера VT2 открывает транзистор VT3 и подключает выход ЛЭ к общей шине. Вследствие падения напряжения на резисторе R2, а также за счет включения диода VD напряжение на переходе база–эмиттер транзистора VT4 оказывается недостаточным для его открывания.

Таким образом, напряжение на выходе ЛЭ не превышает напряжения насыщения транзистора VT3 (примерно 0,2...0,4 В), что соответствует логическому 0.

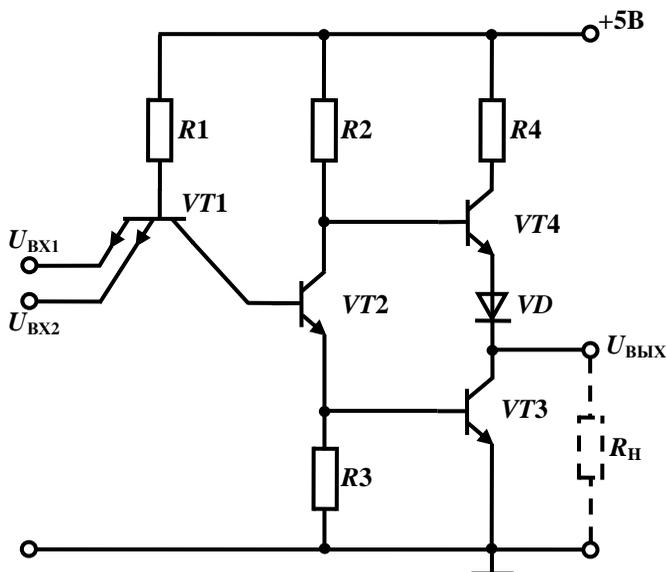


Рис. 6.1. Базовый элемент ТТЛ

Если хотя бы на одном из входов ЛЭ оказывается низкий потенциал, $U_{\text{вх}}^0 \geq 0,4$ В, то через открытый переход база–эмиттер $VT1$ и резистор $R1$ протекает входной ток $I_{\text{вх}}^0 \geq 1,6$ мА, а в базу $VT2$ попадает незначительный по величине обратный ток коллекторного перехода $VT1$. В этом случае транзисторы $VT2$ и $VT3$ заперты, а транзистор $VT4$ открыт и насыщен, так как в его базу протекает ток через резистор $R2$. Выход ЛЭ от шины питания +5 В получает высокий потенциал (логический уровень 1) через переходы $VT4$, диод VD и резистор $R4$.

Данный ЛЭ производит логическое умножение двух входных сигналов с одновременным инвертированием выходной величины (2И-НЕ).

Если в базовом элементе (рис. 6.1) отсоединить элементы $R4$, $VT4$, VD , а в коллектор транзистора $VT3$ включить нагрузку, то вместо инвертирования обеспечивается повторение выходного сигнала.

В настоящее время применяется несколько разновидностей серий микросхем с элементами ТТЛ: стандартные (серии 133; К155),

высокого быстродействия (серии 130; К131), микромощные (серия 134), с диодами Шоттки (серии 530; К531) и микромощные с диодами Шоттки (серия К555). Кроме расширения номенклатуры элементов серий К531 и К555, сейчас активно развивают наиболее перспективные серии ТТЛШ – микромощная К1533 и быстродействующая К1531, выполненные на основе последних достижений технологии изготовления ИС – ионной имплантации и прецизионной фотолитографии.

Наибольшим быстродействием обладают ЛЭ, выполненные по технологии ЭСЛ (эмиттерно-связанная логика) и ТТЛШ (транзисторно-транзисторная логика с транзисторами Шоттки). Меньше потребляет мощности КМДПТЛ (комплементарная МДП-транзисторная логика). Она же лучшая по помехоустойчивости и нагрузочной способности. ЭСЛ и И²Л (интегральная инжекционная логика) меньше других генерируют помехи.

В последние годы получили развитие программируемые логические элементы, на которых с помощью программаторов можно построить многие цифровые устройства.

Любая сложная логическая функция может быть реализована с помощью ЛЭ, выполняющих элементарные функции И-НЕ, ИЛИ-НЕ. Пусть требуется составить комбинационную схему с четырьмя входами x_1, x_2, x_3, x_4 и одним выходом y . Высокий уровень напряжения должен появляться на выходе только при наличии высоких уровней на трех входах, т. е. $y = 1$, при $x_1 = x_2 = x_3 = 1$ и $x_4 = 0$. Такую схему можно составить путем подбора элементов. Например, элемент 3И-НЕ при подаче на его входы $x_1 = x_2 = x_3 = 1$ дает на выходе сигнал $y_1 = 0$. Подавая его и $x_4 = 0$ на вход элемента 2ИЛИ-НЕ, получаем $y = 1$.

Другим способом является преобразование логической функции по правилам алгебры логики (см. табл. 6.3). Для данного примера $y = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot \bar{x}_4$. Используя тождество $x = \bar{\bar{x}}$ и формулы де Моргана, эту функцию можно представить в виде

$$y = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 + x_4.$$

Полученной логической функции соответствует схема рис. 6.2.

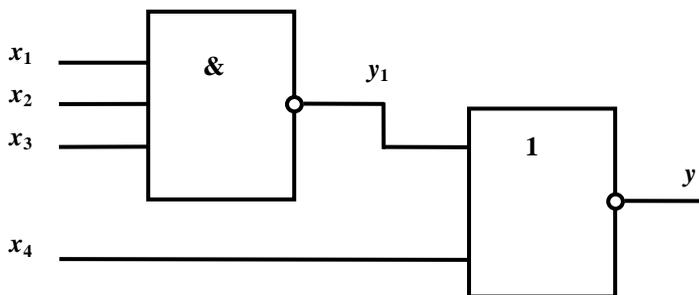


Рис. 6.2. Комбинационная схема «кодový замок»

Предварительное задание к эксперименту

Составить на логических элементах 2И-НЕ (3И-НЕ) и 2ИЛИ-НЕ комбинационную схему, на выходе которой высокий уровень напряжения (логическая 1) появляется *только* при значениях сигналов на входах, заданных в табл. 6.4.

Таблица 6.4

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
x_1	0	0	0	1	0	1	0	1
x_2	0	0	0	1	0	1	1	0
x_3	0	1	1	1	0	1	0	1
x_4	0	0	1	1	–	–	–	–

Порядок выполнения эксперимента

1. Изучить принцип работы логических элементов (см. табл. 6.2).
2. Подавая сигналы с наборного поля на входы логических элементов и соединяя их выходы с элементами индикации, реализовать основные функции одного и двух аргументов. Привести таблицы истинности исследуемых элементов.
3. Собрать схему предварительного задания, проверить правильность работы, составить таблицу истинности.
4. Осуществить выборку с наборного поля следующих чисел (по указанию преподавателя):

- | | |
|------------------------------------|-------------------------------|
| а) всех четных; | б) всех нечетных; |
| в) всех чисел $8 \leq N \leq 15$; | г) всех чисел $N \leq 7$; |
| д) всех чисел, кратных 4; | е) чисел 0, 1, 2, 3; |
| ж) чисел 4, 5, 6, 7; | з) чисел 8, 9, 10, 11; |
| и) 3, 7, 11, 15; | к) 6, 7, 14, 15; |
| л) 4, 5, 12, 13; | м) 2, 6, 10, 14; |
| н) 2, 3, 10, 11; | о) 9, 11, 13, 15; |
| п) 8, 10, 12, 14; | р) 1, 5, 9, 13; |
| с) 1, 3, 9, 11; | т) 4, 6, 12, 14; |
| у) 10, 11, 14, 15; | ф) 1, 2, 5, 6, 9, 10, 13, 14; |
| ц) 0, 3, 4, 7, 8, 11, 12, 15; | ц) 0–3, 8–11. |

5. Собрать схему, реализующую мажоритарную логику (на выходе появляется 1, если на всех трех или на любых двух входах имеется 1).

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Схема базового логического элемента.
3. Схема, составленная в предварительном задании.
4. Таблицы истинности исследуемых логических элементов.
5. Схемы по пп. 4, 5.

Контрольные вопросы

1. Какие операции и тождества алгебры логики Вы знаете?
2. Перечислите логические функции одного и двух аргументов, покажите примеры реализации.
3. Что представляет собой серия цифровых (логических) ИС?
4. Приведите примеры простейших цифровых устройств на основе логических элементов.
5. Реализуйте несколько функций, заданных таблицей истинности.
6. Какой набор логических элементов называют функционально полным (базовым)?
7. Поясните работу базового логического элемента.
8. Как классифицируются ЛЭ по микросхемной реализации?
9. Объясните причины перспективности интегральных логических элементов.

Лабораторная работа № 7

КОМБИНАЦИОННЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ

Цель работы: ознакомление с принципом действия и схемотехникой дешифраторов, мультиплексоров и сумматоров; изучение работы этих комбинационных логических схем; реализация на их основе простейших устройств автоматики.

Общие сведения

Комбинационными называются логические устройства, выходные сигналы которых однозначно определяются комбинацией входных в тот же момент времени. Они используются в информационно-измерительных системах и ЭВМ, системах автоматического управления, устройствах промышленной автоматики и т. п.

Построение *комбинационного логического устройства* осуществляется следующим образом. По требуемому алгоритму работы составляется таблица истинности и соответствующее ей логическое уравнение. Это уравнение минимизируется по правилам алгебры логики с целью упрощения, и затем строится логическая схема на базе логических элементов (ЛЭ) И-НЕ, ИЛИ-НЕ. Наряду с построением устройств промышленность изготавливает наиболее часто встречающиеся *комбинационные логические схемы* (КЛС) в виде интегральных микросхем. Примерами КЛС являются шифраторы, дешифраторы, кодопреобразователи, устройства сравнения (компараторы), мультиплексоры, демультиплексоры, сумматоры, арифметико-логические устройства и др.

Дешифратор (декодер) представляет собой комбинационное устройство, в котором при каждой комбинации входных переменных формируется сигнал высокого или низкого уровня только на одном выходе. Дешифратор называется полным, если число выходов n равно числу возможных наборов сигналов на m входах, т. е. $n = 2^m$. Неполный дешифратор имеет меньшее число выходов. Дешифратор может иметь стробирующий (управляющий) вход. Сигнал на этом входе разрешает или запрещает выполнение операции дешифрования.

Исследуемая ИМС К155ИДЗ (рис. 7.1) представляет собой дешифратор-демультиплексор с 4 на 16. Основу этой микросхемы составляют 16 ЛЭ 5И-НЕ и 8 инверторов. Работа дешифратора определяется таблицей истинности (табл. 7.1). Дешифратор реализует логические функции:

$$F_0 = \bar{A}_3 \bar{A}_2 \bar{A}_1 \bar{A}_0;$$

$$F_1 = \bar{A}_3 \bar{A}_2 \bar{A}_1 A_0;$$

$$F_2 = \bar{A}_3 \bar{A}_2 \bar{A}_1 \bar{A}_0;$$

...

$$F_{15} = \bar{A}_3 \bar{A}_2 \bar{A}_1 \bar{A}_0;$$

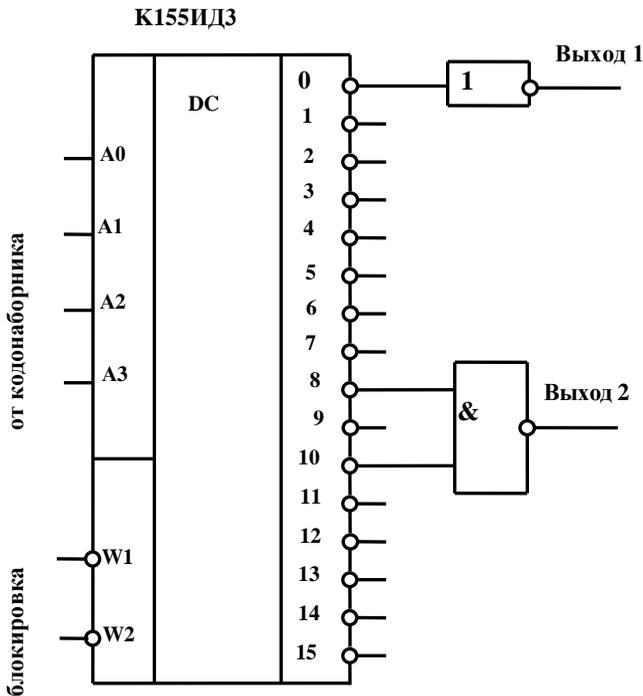


Таблица 7.1

Входы						Выходы						
$\overline{W1}$	$\overline{W2}$	$A3$	$A2$	$A1$	$A0$	$\overline{0}$	$\overline{1}$	$\overline{2}$...	$\overline{13}$	$\overline{14}$	$\overline{15}$
0	0	0	0	0	0	0	1	1	...	1	1	1
0	0	0	0	0	1	1	0	1	...	1	1	1
0	0	0	0	1	0	1	1	0	...	1	1	1
									...			
0	0	1	1	0	1	1	1	1	...	0	1	1
0	0	1	1	1	0	1	1	1	...	1	0	1
0	0	1	1	1	1	1	1	1	...	1	1	0
0	1	x	x	x	x	1	1	1	...	1	1	1
1	0	x	x	x	x	1	1	1	...	1	1	1
1	1	x	x	x	x	1	1	1	...	1	1	1

Примечание: здесь и далее x – любое значение сигнала.

Он позволяет преобразовать четырехразрядный двоичный код, поступивший на входы $A0...A3$, в напряжение низкого уровня, появляющееся на одном из шестнадцати выходов $\overline{0}...15$. Если входные переменные представить как двоичную запись чисел, то логический нуль формируется на том выходе, номер которого соответствует десятичной записи того же числа (см. табл. 7.1). Кроме четырех входов $A0...A3$ устройство имеет еще два входа $\overline{W1}$ и $\overline{W2}$ разрешения дешифрации. Они играют роль стробирующих входов, если на них подан низкий уровень напряжения. Если хотя бы на одном из входов $\overline{W1}$ и $\overline{W2}$ установить высокий уровень, то на всех выходах $\overline{0}...15$ будет высокий уровень напряжения. Такой режим используется при наращивании числа разрядов дешифрируемого кода.

Входы $\overline{W1}$ и $\overline{W2}$ можно использовать как логические, тогда микросхема ИДЗ служит демультимплексором данных. Входы $A0...A3$ в этом случае используются как адресные, чтобы направить поток данных, принимаемых входами $\overline{W1}$ или $\overline{W2}$, на один из выходов $\overline{0}...15$. Подобные задачи возникают при дистанционном управлении, в преобразователях последовательного кода в параллельный и т. п.

Принцип выбора «1 из n » используется для управления индикаторами в устройствах отображения информации, в различных схе-

мах распределителей импульсов по нескольким каналам (в данном случае – до 16). Как видно из рис. 7.1, на выходе 1 высокий логический уровень появится только при кодовом наборе 0000, на выходе 2 – при наборах 1000 или 1010.

Если в системах управления применяются генератор тактовых импульсов и четырехразрядный счетчик, то дешифратор можно использовать в качестве делителя частоты (рис. 7.1) или формирователя импульсов (рис. 7.2), благодаря цикличности «перемещения» логических уровней по выходам. Формирование конечной последовательности импульсов может осуществляться различными способами (рис. 7.2). Например, на выходе 1 длительность сформированного импульса равна половине цикла, т. к. переключение \overline{RS} - триггера происходит при прохождении нулевого сигнала на выходах 0 и 8 дешифратора. При выборе других точек подключения входа 2 скважность ($q = T_{\text{цикла}} / t_{\text{имп}}$) можно изменять в широких пределах (от 1,1 до 16). В другом примере (рис. 7.2) показан простой способ получения пакета из двух импульсов на выходе одного ЛЭ. Аналогичная схемотехника используется и для формирования последовательности импульсов различной длительности.

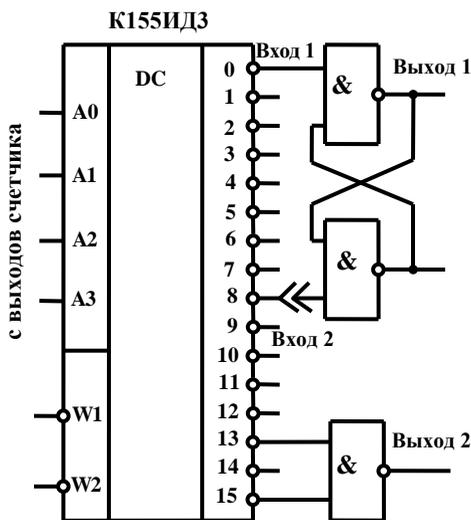


Рис. 7.2 Формирование импульсов

Мультиплексор (управляемый кодом переключатель) предназначен для коммутации одного из m входов на выход. Входы мультиплексора (m информационных и k управляющих) находятся в следующем соответствии: $m = 2^k$. Выход обычно один, он может быть прямым или инверсным.

Микросхема К155КП5 представляет собой восьмиканальный мультиплексор без стробирования (рис. 7.3). Основу его схемы составляет один ЛЭ 4И-8ИЛИ-НЕ и 6 простых инверторов. Он имеет 8 информационных входов $D0...D7$, 3 адресных входа $V0...V2$ и выход \bar{Y} .

Логическое уравнение имеет вид

$$\bar{Y} = D0\bar{V}2\bar{V}1\bar{V}0 + D1\bar{V}2\bar{V}1\bar{V}0 + D2\bar{V}2\bar{V}1\bar{V}0 + D3\bar{V}2\bar{V}1\bar{V}0 + D4\bar{V}2\bar{V}1\bar{V}0 + D5\bar{V}2\bar{V}1\bar{V}0 + D6\bar{V}2\bar{V}1\bar{V}0 + D7\bar{V}2\bar{V}1\bar{V}0.$$

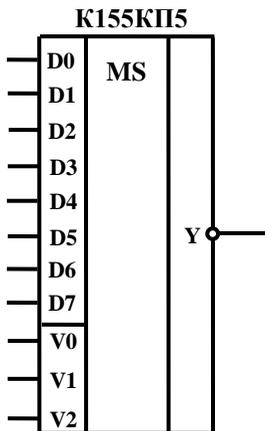


Рис. 7.3. Мультиплексор

Состояние мультиплексора определяется таблицей истинности (табл. 7.2). Как видно из таблицы, мультиплексор выполняет функции простого инвертора только по тому каналу, номер которого соответствует двоичному коду адресных входов. Поэтому мультиплексор нашел широкое применение в качестве преобразователя параллельного кода в последовательный, для передачи информации по линиям связи и для последовательного опроса (контроля) при большом числе каналов или устройств.

Таблица 7.2

Адресные входы			Информационные входы								Выход
V2	V1	V0	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	\bar{Y}
0	0	0	0	x	x	x	x	x	x	x	1
0	0	0	1	x	x	x	x	x	x	x	0
0	0	1	x	0	x	x	x	x	x	x	1
0	0	1	x	1	x	x	x	x	x	x	0
...
1	1	1	x	x	x	x	x	x	x	0	1
1	1	1	x	x	x	x	x	x	x	1	0

Сумматор предназначен для сложения двух чисел, заданных в двоичном коде. Число входов и выходов сумматора определяется разрядностью слагаемых. Одноразрядный двоичный сумматор характеризуется таблицей истинности (табл. 7.3). Такой сумматор называется *полным*, т. к. обрабатывается сигнал переноса с предыдущего разряда P_i и выдается сигнал переноса на последующий разряд P_{i+1} . Схемотехника сумматоров строится на ЛЭ «Исключающее ИЛИ» (функция «неравнозначность») для суммирования и ЛЭ И-НЕ для переноса:

$$P_{i+1} = A_i B_i + (A_i \oplus B_i) P_i;$$

$$S_i = (A_i \oplus B_i) \oplus P_i.$$

Таблица 7.3

Входы			Выходы	
A_i	B_i	P_i	S_i	P_{i+1}
0	0	0	0	0
0	0	1	1	0
0	1	0	1	0
0	1	1	0	1
1	0	0	1	0
1	0	1	0	1
1	1	0	0	1
1	1	1	1	1

Микросхема К155ИМ3 (рис. 7.4) представляет собой четырехразрядный сумматор с параллельным поразрядным сложением и последовательным формированием сигнала переноса. Он имеет два четырехразрядных числа по входам данных $A_0...A_3$ и $B_0...B_3$, а по входу P_0 – сигнал переноса с предыдущего разряда. Сумма разрядов входных чисел появляется на выходах $S_0...S_3$. На выходе P_4 выделяется сигнал переноса на последующий разряд.

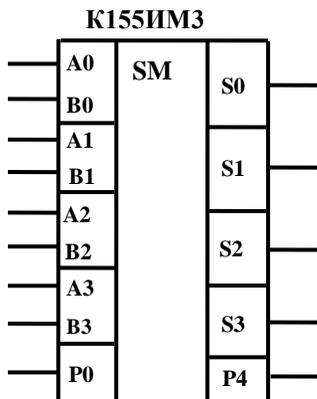


Рис. 7.4. Сумматор

Суммирование происходит по уравнению

$$P_0 + 2^0(A_0 + B_0) + 2^1(A_1 + B_1) + 2^2(A_2 + B_2) + 2^3(A_3 + B_3) = 2^0S_0 + 2^1S_1 + 2^2S_2 + 2^3S_3 + 2^4P_4.$$

Сумматор можно использовать для вычитания чисел. Для этого вычитаемое представляют в дополнительном коде, который образуется из обратного (инверсного) кода добавлением к нему единицы. Так, четырехразрядное число B , записанное в прямом коде, $B_{пр} = B_3B_2B_1B_0$, может быть представлено в обратном, $B_{обр} = \bar{B}_3\bar{B}_2\bar{B}_1\bar{B}_0$, и в дополнительном коде, $B_{доп} = B_{обр} + 1$.

Операцию вычитания можно представить в виде

$$A_{пр} - B_{пр} = A_{пр} + B_{доп} - 10\ 000.$$

Сумматор может работать и как компаратор чисел. Для этого второе сравниваемое число подают в обратном коде (например, че-рез инверторы). Тогда, при $A = B$, на выходах $S_0 = S_1 = S_2 = S_3 = 1$, $P_4 = 0$; при $A > B$, $P_4 = 1$.

Разрабатываемые схемы будут проще, если учесть, что при использовании микросхем 155 серии на неподключенных входах генерируются 1, поэтому достаточно подключать с наборного поля только нулевые сигналы.

Предварительное задание к эксперименту

1. Изучить принцип работы дешифратора К155ИДЗ, мультиплексора К155КП5 и сумматора К155ИМЗ.

2. Используя микросхемы К155ЛА3 (4 ЛЭ 2И-НЕ), К155ЛА4 (3 ЛЭ 3И-НЕ), К155ЛН1 (6 ЛЭ НЕ), К155ЛР1 (2 ЛЭ 2И-2ИЛИ-НЕ), составить схему включения дешифратора в качестве формирователя пакета импульсов с параметрами, заданными в табл. 7.4. Частота переключения генератора тактовых импульсов равна 1 Гц.

Таблица 7.4

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
Количество импульсов в пакете	1	2	3	4	5	6	1	3
Длительность одиночного импульса, с	3	2	1	1	1	1	4	1
Период повторения пакета, с	8	16	8	16	16	16	16	16
A	3	5	7	9	10	12	13	15
B	15	14	13	12	7	10	8	4

3. Составить схему включения мультиплексора, реализующую мажоритарную логику (на выходе появляется 1, если на всех трех или на любых двух адресных входах имеется 1).

4. Перевести в двоичный код и сложить числа A и B , заданные в табл. 7.4.

Порядок выполнения эксперимента

1. Исследовать работу дешифратора в качестве преобразователя кодов. Проверить таблицу соответствия между логическими уровнями на выходах и кодовыми наборами на входах (см. табл. 7.1).

2. Собрать схему включения дешифратора, составленную в предварительном задании, и проверить ее работоспособность. Нарисовать временные диаграммы.

3. Исследовать работу мультиплексора. Для этого подать сигналы на информационные входы $D_0...D_7$ с выходов дешифратора $\bar{0}...7$, а адресные входы $V_0...V_2$ соединить с шинами наборного поля. Проверить таблицу состояний (см. табл. 7.2).

4. Собрать схему включения мультиплексора, реализующую мажоритарную логику, и проверить ее работоспособность. Нарисовать временные диаграммы.

5. Исследовать работу сумматора, набрав на входах двоичные числа A и B . Проверить результат суммирования, полученный в предварительном задании.

6. *Факультативно.* Использовать сумматор в качестве вычитателя и компаратора чисел A и B . Пояснить результаты.

7. Собрать схему сигнализации нулевого результата сложения ($S_0 = S_1 = S_2 = S_3 = 0$), используя имеющиеся на лабораторном стенде ЛЭ и один элемент индикации.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Таблицы истинности дешифратора и мультиплексора.
3. Составленные в предварительном задании схемы включения дешифратора с временными диаграммами.
4. Результаты сложения вычитания и сравнения заданных чисел A и B .
5. Схема сигнализации нулевого результата сумматора.

Контрольные вопросы

1. Чем отличаются КЛС от ЛЭ? Дайте сравнительный анализ на конкретных примерах.

2. Объясните назначение и области применения дешифратора.
3. Каков принцип работы исследуемого дешифратора?
4. Каким образом с помощью мультиплексора можно обеспечить постоянный обегаящий контроль 6 различных каналов или выходов ЛЭ?
5. Равноценны ли по своему функциональному назначению управляющие входы дешифратора и адресные входы мультиплексора?
6. Объясните принцип действия сумматора.
7. Как реализуется вычитание двоичных чисел?

Лабораторная работа № 8

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИГГЕРНЫХ СХЕМ

Цель работы: изучение схем и функциональных возможностей основных типов триггеров; экспериментальное изучение триггеров и схем управления.

Общие сведения

Триггерами называют электронные устройства, обладающие двумя состояниями устойчивого равновесия и способные под воздействием управляющего сигнала переходить скачком из одного состояния в другое. Каждому состоянию триггера соответствует определенный (высокий или низкий) уровень выходного напряжения, который может сохраняться как угодно долго. Поэтому триггеры относятся к цифровым автоматам с памятью. В настоящее время триггеры выполняются на основе логических элементов в виде интегральных микросхем (ИМС). Триггеры применяются как переключающие элементы самостоятельно или входят в состав более сложных цифровых устройств таких, как счетчики импульсов, делители частоты, регистры и др.

В общем случае триггер имеет два выхода: прямой (Q) и инверсный (\bar{Q}), сигналы на которых противоположны по уровню. Состояние триггера определяется выходом Q . По способу управления триггеры делятся на *асинхронные*, состояние которых меняется в момент поступления информационного сигнала, и *синхронизируемые (синхронные)*, которые срабатывают только при подаче разрешающего или синхронизирующего сигнала

По функциональному назначению различают триггеры: RS , D , T , JK .

По виду активного логического сигнала триггеры разделяют на *статические*, управляемые уровнем (0 или 1), и *динамические*, управляемые перепадом входного сигнала (фронтом или срезом).

Работа триггера может быть описана логическим уравнением, связывающим состояние входов и выходов триггера до его срабатывания (t) и после срабатывания ($t+1$). Состояние триггера можно задать таблицей состояний или временной диаграммой его работы.

Асинхронный *RS-триггер* – простейший элемент памяти, который может быть реализован на логических элементах (ЛЭ) 2ИЛИ-НЕ или 2И-НЕ. В зависимости от этого данный триггер может обладать либо инверсными, либо прямыми информационными входами.

Схема триггера на ЛЭ 2ИЛИ-НЕ и его условное обозначение показаны на рис. 8.1. При $S = R = 0$ схема устойчива, обеспечивается режим хранения информации.

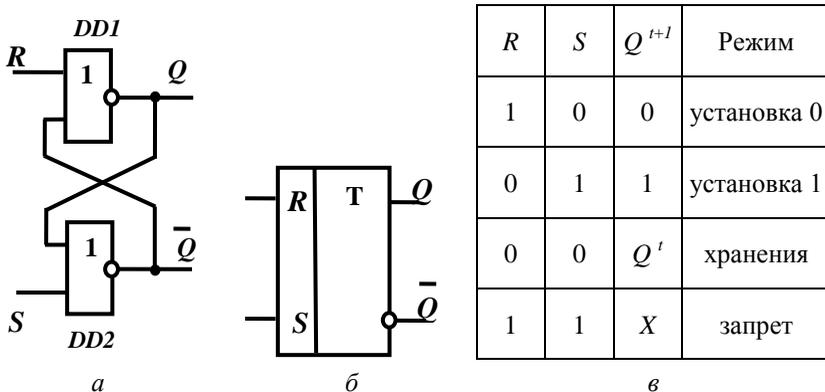


Рис. 8.1. Асинхронный *RS-триггер* на элементах 2ИЛИ-НЕ:

a – структурная схема; *б* – обозначение *RS-триггера*;

в – таблица состояний

Если $Q = 1$, то на входах *DD2* сигналы 1 и 0, при которых на выходе элемента формируется $\bar{Q} = 0$. На входах *DD1* сигналы 0 и 0, что сохраняет этот элемент в состоянии $Q = 1$. Для изменения состояния триггера на его входы надо подать комбинацию сигналов $R = 1, S = 0$. Тогда на входе *DD1* появится высокий уровень и этот элемент перейдет в состояние $Q = 0$. На входах *DD2* установятся сигналы 0, 0, и логический элемент перейдет в состояние $Q = 1$. Комбинация $S = 1, R = 0$ возвратит триггер в состояние $Q = 1, \bar{Q} = 0$. При входных сигналах $S = 1, R = 1$ состояние триггера неопределенно, т. к. при такой комбинации на входах триггера $Q = \bar{Q}$ – эта комбинация запрещена. Работа триггера иллюстрируется таблицей состояний (рис. 8.1, *в*).

Схема и условное обозначение RS -триггера на ЛЭ 2И-НЕ показаны на рис. 8.2.

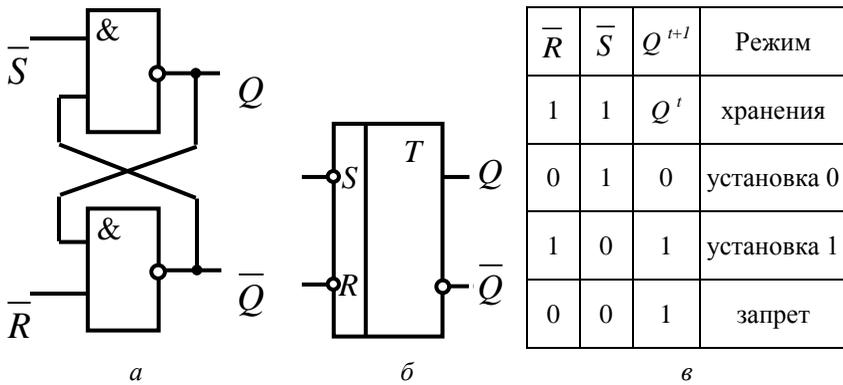


Рис. 8.2. Асинхронный RS -триггер на элементах 2И-НЕ:
 а – структурная схема; б – обозначение RS -триггера;
 в – таблица состояний

Триггер имеет два информационных входа – S и R , переключение производится логическим «0». Поступление управляющего сигнала на вход S переводит триггер в состояние логической «1» ($Q = 1, \bar{Q} = 0$). Подача управляющего сигнала на R обеспечивает переход триггера в состояние логического «0» ($Q = 0, \bar{Q} = 1$). Запрещенная комбинация соответствует логическим «0» на обоих входах. Отсутствие управляющего сигнала реализует режим хранения информации.

Синхронный RS -триггер может быть получен на базе асинхронного RS -триггера, введением дополнительной логической схемы, которая формировала бы на его входах активные логические уровни только при наличии сигнала синхронизации C . Структурная схема и условно графическое обозначение синхронного RS -триггера приведены на рис. 8.3.

D-триггер имеет информационный вход D и синхровход C . Его можно построить на основе RS -триггера, добавив схему управления из двух логических элементов 2И-НЕ (рис. 8.4).

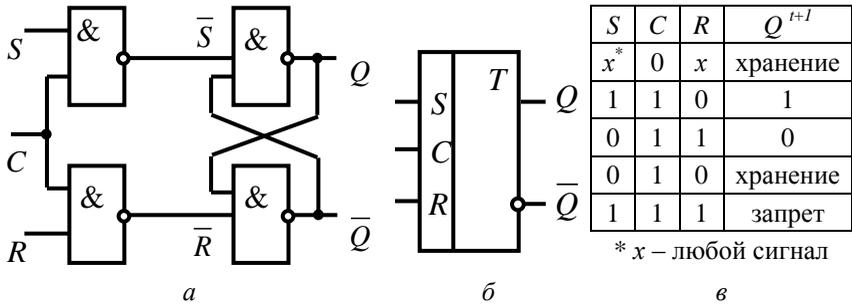


Рис. 8.3. Синхронный RS -триггер на элементах 2И-НЕ:
 а – структурная схема; б – обозначение синхронного RS -триггера;
 в – таблица состояний

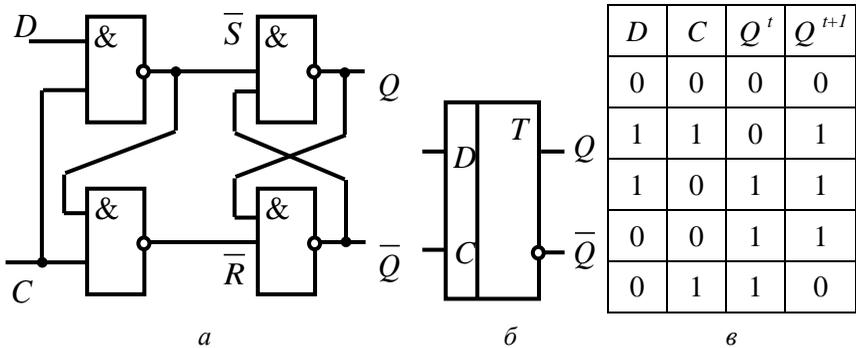


Рис. 8.4. D -триггер
 а – структурная схема; б – обозначение D -триггера;
 в – таблица состояний

Вход C подает синхроимпульс на оба элемента 2И-НЕ и готовит срабатывание схемы управления. Если синхроимпульс отсутствует ($C = 0$), схема пассивна при любом сигнале на входе D , так как на выходах элементов 2И-НЕ удерживаются высокие уровни напряжения (1), при которых не происходит переключение внутреннего RS -триггера.

Пусть в момент прихода синхроимпульса $D = 0$, тогда на вход \bar{S} попадает сигнал 1, а на вход $\bar{R} = 0$. Триггер переходит в состояние $Q = 0$. Он сохранит это состояние до следующего синхроимпульса,

даже если на входе D появится высокий уровень ($D = 1$). Только при $D = 1$ и $C = 1$ окажется $\bar{R} = 1$, $\bar{S} = 0$, и триггер примет состояние $Q = 1$. Это состояние опять задержится на один такт. Поэтому D -триггеры называют *триггерами задержки*.

На лабораторном стенде D -триггер представлен микросхемой K155TM2 (рис. 8.5), которая кроме информационного входа D и синхронизирующего C содержит также и инверсные входы асинхронной установки \bar{R} , \bar{S} . Установка триггера по сигналам \bar{R} , \bar{S} входов выполняется независимо от состояния остальных входов. Данный триггер имеет динамический вход C , т. е. способен изменять свое состояние только в момент перепада синхроимпульса с 0 на 1 (фронтом импульса).

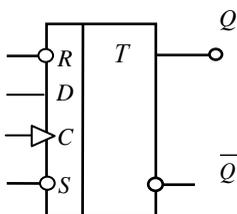


Рис. 8.5. D -триггер с динамическим C входом. Микросхема K155TM2

Счетный T -триггер имеет один управляющий вход T . Его условное обозначение и временные диаграммы состояний показаны на рис. 8.6. Состояние T -триггера изменяется на противоположное при каждом изменении входного сигнала.

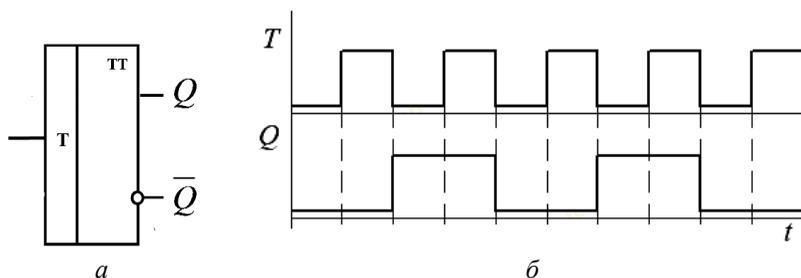


Рис. 8.6. T -триггер:
 a – обозначение; $б$ – временная диаграмма

Частота выходных импульсов в 2 раза ниже частоты входных. Поэтому T -триггеры используются как делители частоты на 2 или счетчики по модулю 2. В виде ИМС триггеры этого типа не выпускаются. Их можно легко создать на основе D - и JK -триггеров.

JK -триггеры относятся к универсальным, имеют информационные входы J и K и синхронизирующий вход C . Они используются при создании счетчиков, регистров и других устройств. При определенном переключении входов JK -триггеры могут работать как асинхронный RS -триггер, D -триггер и T -триггер. Благодаря такой универсальности они имеются во всех сериях ИМС. Условное обозначение JK -триггера показано на рис. 8.7, а. Асинхронная установка триггера в исходное состояние $Q = 1$ или $Q = 0$ осуществляется подачей сигналов $S = 0$ или $R = 0$. Эти команды выполняются при любых сигналах на других входах. В остальном JK -триггер работает, как синхронный, т. е. команды выполняются только при поступлении импульса на вход C . Наличие высокого уровня на J -входе ($J = 1$) переводит триггер в состояние $Q = 1$, а сигнал $K = 1$ соответствует $Q = 0$. При высоком уровне на обоих входах ($J = K = 1$) он работает как T -триггер (рис. 8.7, б). На рис. 8.7, в, показана схема использования JK -триггера в качестве D -триггера.

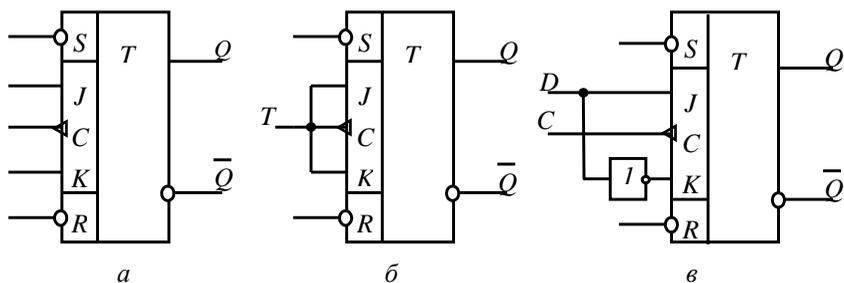


Рис. 8.7. JK -триггер:

а – обозначение микросхемы К155ТВ1; б – схема реализации T -триггера на JK ;
в – схема реализации D -триггера на JK

На лабораторном стенде JK -триггер представлен микросхемой К155ТВ1, которая имеет динамический синхровход C , что обеспечивает синхронный режим работы при приходе среза импульса C (перепад с 1 на 0).

Предварительное задание к эксперименту

1. Изучить принцип действия основных типов триггеров.

2. По заданным временным диаграммам (рис. 8.8, 8.9) входных сигналов для D - и JK -триггеров определить состояние выходов Q или \bar{Q} (в соответствии с вариантом в табл. 8.1), приняв предустановку триггеров $Q = 0$. При формировании состояния триггеров необходимо учитывать, что JK - и D -триггеры, представленные на лабораторном стенде, являются триггерами с динамическим управлением. D -триггер способен изменить состояние по фронту импульса C , а JK – по срезу.

Таблица 8.1

Вариант		1	2	3	4	5	6	7	8
Триггеры	D	\bar{Q}	Q	Q	\bar{Q}	Q	\bar{Q}	Q	\bar{Q}
	JK	Q	Q	\bar{Q}	Q	\bar{Q}	\bar{Q}	Q	\bar{Q}
	T на	JK	D	JK	D	JK	D	JK	D

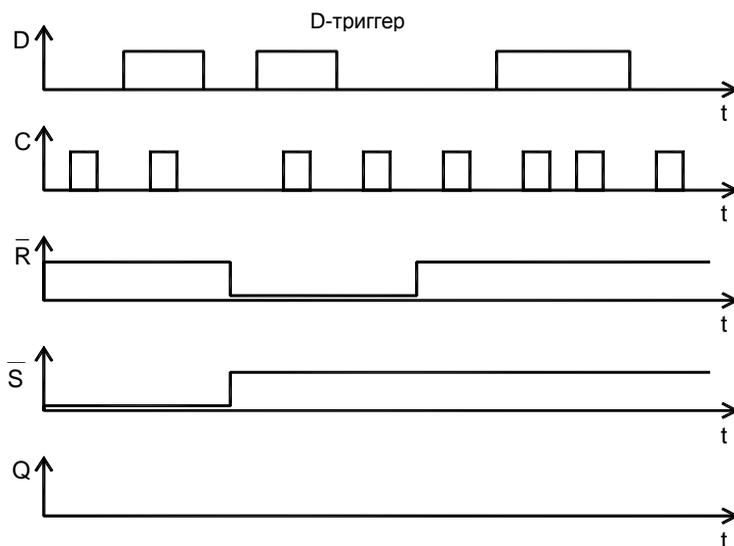


Рис. 8.8. Временные диаграммы входных сигналов для триггеров D и JK

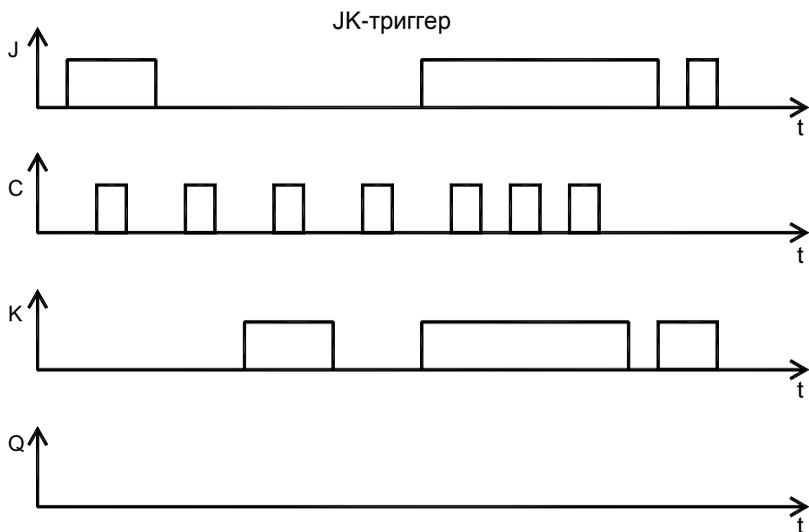


Рис. 8.9. Временные диаграммы входных сигналов для триггеров *D* и *JK*
(окончание рис. 8.8)

Порядок выполнения эксперимента

1. Ознакомиться с устройством стенда для исследования различных типов триггеров. Наборное поле позволяет формировать высокий (горит) либо низкий (не горит) уровень входного сигнала, а индикаторы отражают состояние выходов триггера.

2. Собрать схему асинхронного *RS*-триггера на логических элементах 2И-НЕ.

3. Исследовать работу асинхронного *RS*-триггера. Составить временную диаграмму работы триггера.

4. Исследовать работу синхронного *RS*-триггера. Составить временную диаграмму работы триггера. Пояснить преподавателю свои выводы о различиях в работе синхронного и асинхронного триггера.

5. Исследовать работу *D*-триггера. Подавая заданную комбинацию входных сигналов зафиксировать состояние триггера и сравнить с теоретически полученной временной диаграммой. Проанализировав работу *D*-триггера, пояснить, почему его называют триггером задержки?

6. Исследовать работу JK -триггера. Подавая заданную комбинацию входных сигналов зафиксировать состояние триггера и сравнить с теоретически полученной временной диаграммой.

7. Исследовать работу T -триггера на базе JK -либо D -триггера, в соответствии с предварительным заданием. Подключить последовательно два T -триггера. Отразить работу при помощи временной диаграммы и сравнить частоту входных и выходных сигналов.

Контрольные вопросы

1. Что такое триггер?
2. Для чего используются триггеры?
3. Чем отличается прямой и инверсный выходы триггера?
4. Как работают RS -триггеры? Начертите временную диаграмму и таблицу истинности.
5. Как работают D -триггеры?
6. Для чего применяют синхровход триггера?
7. Поясните принцип работы T -триггера. Начертите временные диаграммы.
8. Начертите схему делителя частоты импульсов на 8.

Лабораторная работа № 9

СЧЕТЧИКИ ИМПУЛЬСОВ И РЕГИСТРЫ

Цель работы: изучение устройства и работы счетчиков импульсов и регистров.

Общие сведения

Счетчик – это последовательностное устройство, которое может иметь не более чем 2^n внутренних состояний, где n – число триггеров, входящих в состав счетчика. Счетчики используются для подсчета числа двоичных импульсов. В микропроцессорных устройствах они применяются для формирования адресов, подсчета количества циклов и т. д.

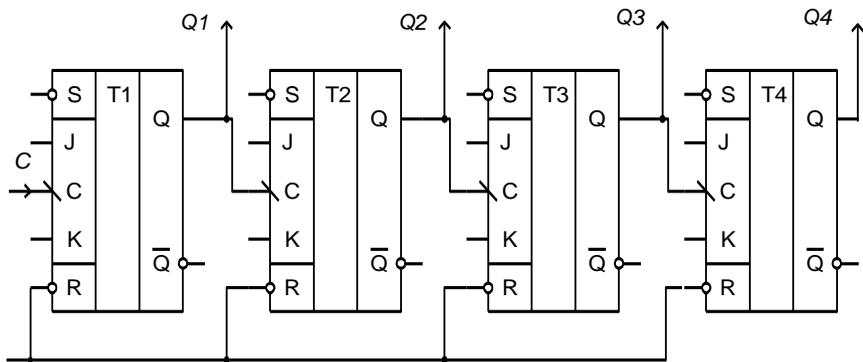
Основным параметром счетчика является *коэффициент*, или *модуль счета*, K – это наибольшее число импульсов, которое может быть подсчитано счетчиком и равно максимальному числу внутренних состояний 2^n . В зависимости от модуля счета различают двоичные ($K = 2^n$, где n – число триггеров), декадные, или десятичные ($K = 10^m$, где m – число десятичных разрядов), с произвольным постоянным и с переменным модулем.

По способу изменения выходного кода счетчики делятся на *суммирующие*, *вычитающие* и *реверсивные*. У суммирующего счетчика выходной код увеличивается на единицу для каждого нового состояния, а у вычитающего – уменьшается на единицу. Реверсивный счетчик может работать в обоих режимах.

По способу управления внутренними триггерами счетчики подразделяются на *асинхронные* (последовательные) и *синхронные* (параллельные).

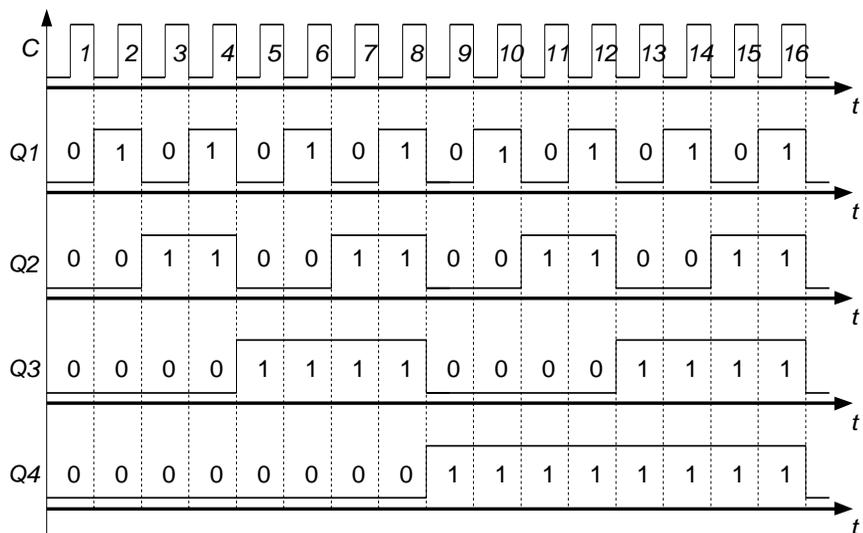
В *асинхронных* счетчиках переключение последующего триггера осуществляется выходным сигналом предыдущего, а входные счетные импульсы приходят на вход только младшего (нулевого) триггера.

Рассмотрим работу асинхронного суммирующего счетчика, выполненного на четырех JK-триггерах (рис. 9.1, а). Работу счетчика однозначно определяет таблица состояний (табл. 9.1) или временная диаграмма (рис. 9.1, б).



Усм. "0"

a



б

Рис. 9.1. Асинхронный суммирующий счетчик:
a – схема соединения триггеров; *б* – временная диаграмма

В исходном состоянии на объединенные входы R всех триггеров подается низкий уровень сигнала ($R = 0$) для предварительного обнуления счетчика и установки на всех прямых выходах логического нуля: $Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_4 = 0$.

Таблица состояний триггеров

Число импульсов	Состояние прямых выходов			
	Q_4	Q_3	Q_2	Q_1
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
3	0	0	1	1
4	0	1	0	0
5	0	1	0	1
6	0	1	1	0
7	0	1	1	1
8	1	0	0	0
...
15	1	1	1	1
16	0	0	0	0

Счетные импульсы приходят на вход первого триггера T_1 . Выходами счетчика являются прямые выходы триггеров, с которых информация о состоянии предыдущего триггера передается на синхровход последующего. Значение переменной Q_i соответствующего разряда счетчика изменяется, когда переменная в соседнем младшем разряде Q_{i-1} переходит из состояния «1» в «0» (табл. 9.1). Для реализации этого свойства последовательного счетчика JK -триггеры в схеме работают в режиме T -триггера с переключением в новое состояние по спаду входного синхроимпульса. Таким образом, частота выходного сигнала каждого триггера в два раза меньше, чем частота сигнала на его входе (рис. 9.1, б). Счетчик на выходах формирует нарастающие кодовые наборы от 0000 до 1111, являющиеся двоичными эквивалентами десятичных чисел от 0 до 15. Шестнадцатый импульс переводит все триггеры в исходное нулевое состояние ($K = 2^4 = 16$).

Если в качестве выходов счетчика использовать прямые выходы триггеров, а на синхровходы последующих триггеров подавать сигналы с инверсных выходов предыдущих триггеров, получим вычитающий счетчик. Перед началом счета должна быть предусмотрена

установка всех его триггеров в исходное состояние «1». При счете импульсов вычитающий счетчик будет формировать на прямых выходах триггеров убывающие кодовые наборы от 1111 до 0000.

В *синхронных* (параллельных) счетчиках счетные импульсы поступают одновременно на входы синхронизации всех триггеров (рис. 9.2). Значение Q_i изменится при поступлении очередного счетного импульса в том случае, если переменные во всех младших разрядах Q_{i-1}, \dots, Q_1 находятся в состоянии «1» (табл. 9.1).

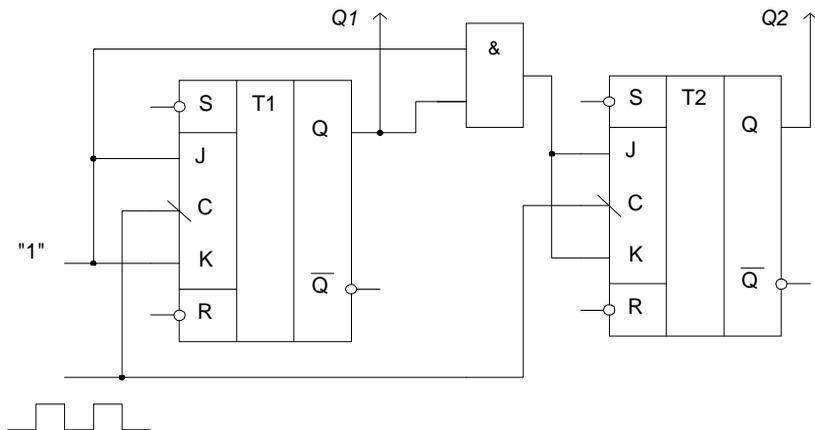


Рис. 9.2. Синхронный параллельный счетчик

Счетчики изготавливаются в виде готовых микросхем. Например, микросхема К155ИЕ2 – это двоично-десятичный счетчик; микросхема К155ИЕ4 имеет модуль счета 13, а К155ИЕ6 – реверсивный счетчик с предустановкой.

В тех случаях, когда требуется счетчик с модулем счета меньшим, чем 2^n состояний, избыточные состояния исключаются с помощью комбинационной схемы. На рис. 9.3 показана схема суммирующего счетчика с $K = 6$. После шестого импульса сигналы с выходов $Q_2 = 1$ и $Q_3 = 1$ вызовут появление «0» на выходе элемента 2И-НЕ, что, в свою очередь, приведет к обнулению всех триггеров. Логический элемент 2И-НЕ в данном случае играет роль комбинационной схемы, выявляющей значение выходного кода, при котором счетчик должен устанавливаться в начальное состояние.

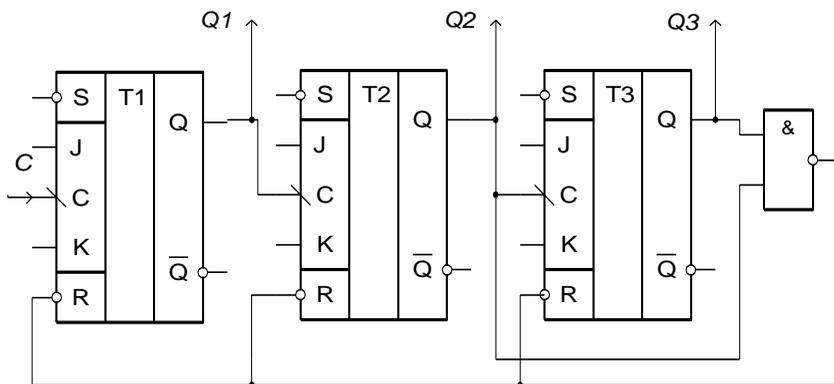


Рис. 9.3. Суммирующий счетчик с ограниченным модулем счета

Микросхема К155ИЕ7 представляет собой двоичный четырехразрядный реверсивный счетчик широкого применения. Его основу составляют четыре JK -триггера, а вспомогательные операции выполняются 18 логическими элементами. Счетчик имеет управляющий вход V , два счетных входа (прямого $C1$ и обратного $C2$ счета), четыре информационных входа предустановки $D3, D2, D1, D0$, соответствующие выходы $Q3, Q2, Q1, Q0$, а также два инверсных выхода переноса B и P . Условное обозначение приведено на рис. 9.4.

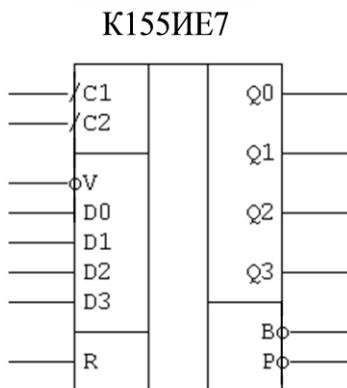


Рис. 9.4. Микросхема К155ИЕ7 – двоичный четырехразрядный реверсивный счетчик

В зависимости от состояний входов возможны три режима работы счетчика:

– *режим счета* реализуется, когда $V = 1$: при подаче счетных импульсов на вход $C1$ происходит увеличение двоичного выходного кода, при подаче импульсов на вход $C2$ – уменьшение;

– *режим параллельной записи* обеспечивается, когда $V = 0$, при этом кодовые наборы, установленные на информационных входах, повторяются на выходах соответствующих разрядов независимо от состояния счетных входов;

– *сброс счетчика* осуществляется подачей высокого уровня напряжения на вход R , что приводит к отключению всех других входов и запрещению записи.

Регистры широко используются для передачи, хранения и преобразования двоичных кодов. В зависимости от функционального назначения различают регистры *сдвига* (последовательные) и *памяти* (параллельные).

В четырехразрядном *регистре сдвига*, выполненном на *JK*-триггерах (рис. 9.5), с приходом каждого тактового импульса на входы C происходит последовательная запись сигналов с прямых и инверсных выходов на информационные входы каждого последующего триггера, от младшего разряда к старшему.

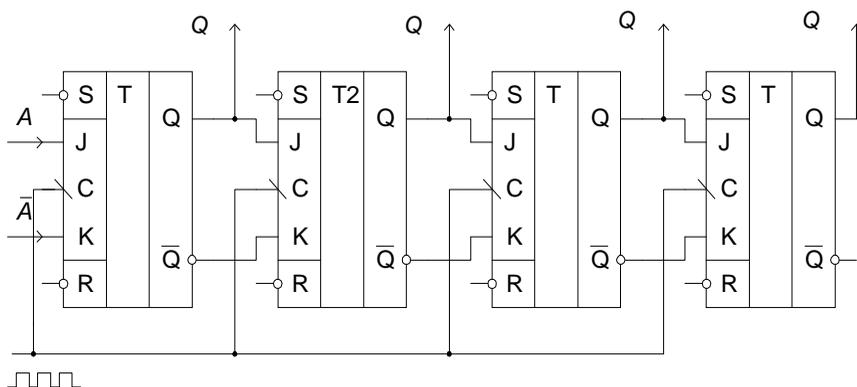


Рис. 9.5. Четырехразрядный регистр сдвига

Если на информационных входах триггера $T1$ $J = 0, K = 1$, то в исходном состоянии на выходах $Q1 = 0, \bar{Q}2 = 1$. Эти же уровни сигналов последовательно передаются каждому триггеру после прихода тактовых импульсов, но не изменяют их состояния. Если же на входе первого триггера $J = 1, K = 0$, то после первого тактового импульса на его выходах установятся новые логические уровни, $Q1 = 1, \bar{Q}1 = 0$; вторым тактовым импульсом переключится второй триггер и т. д. (рис. 9.6). Очевидно, что четвертый тактовый импульс сдвинет уровень логической 1 в четвертый триггер, и на выходах регистра появится кодовый набор 1111. В этом случае можно считать, что регистр работает в режиме преобразователя, с последовательным вводом и параллельным выводом информации объемом 4 бита.

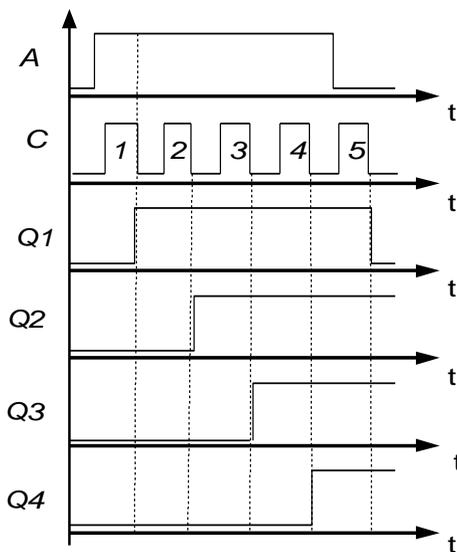


Рис. 9.6. Временная диаграмма регистра сдвига

Микросхема К155ИР1 (рис. 9.7) является универсальным четырехразрядным регистром сдвига. Основу этой ИС составляют четыре триггера и одиннадцать логических элементов. Регистр имеет тактовый вход сдвига $C1$ и информационный вход $V1$ для записи последовательных сигналов, четыре информационных входа $D1$,

D2, D3, D4 параллельной записи, тактовый вход *C2* ввода этой информации, а также вход *V2* выбора режима работы и выходы 1-2-4-8 всех четырех разрядов. Два основных режима работы «Сдвиг» и «Запись» выбираются по уровню сигнала на входе *V2*.

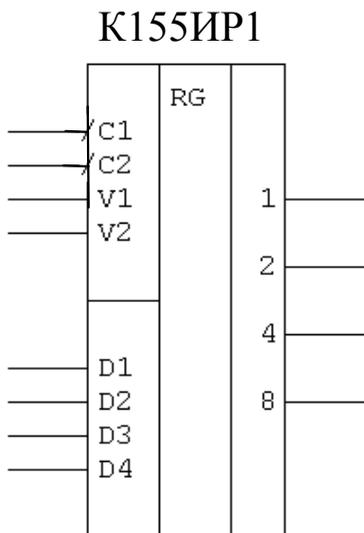


Рис. 9.7. Микросхема К155ИР1 – универсальный четырехразрядный регистр сдвига

Если на вход *V2* подается логический 0, то регистр работает в режиме сдвига информации от младшего разряда к старшему. Любой последовательный кодовый набор на входе *V1* перемещается на выходы 1-2-4-8 отрицательными перепадами четырех тактовых импульсов по входу *C1*.

Если на вход *V2* подается сигнал 1, то обеспечивается режим параллельной записи в регистр любого кодового набора со входов *D1, D2, D3, D4* по срезу тактового импульса на входе *C2*.

Регистры памяти обычно выполняются на двухступенчатых *D*-триггерах и предназначены для приема, хранения и передачи двоичной информации в виде параллельного кода. Входная информация одновременно подается на входы регистра, при поступлении синхронизирующего импульса записывается и хранится в разрядах регистра.

Микросхема K155TM5 (рис. 9.8) представляет собой четырехразрядный регистр памяти. В одном корпусе этой ИС находятся четыре независимых D-триггера, с информационными входами D4...D1 и прямыми выходами Q4...Q1. Управление работой ИС осуществляется по объединенным попарно входам синхронизации G1-G2 и G3-G4.

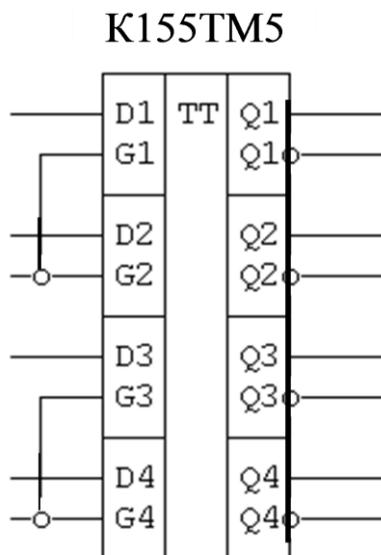


Рис. 9.8. Микросхема K155TM5 – четырехразрядный регистр памяти

Использование двухступенчатых триггеров задержки обуславливает различные режимы работы данной схемы: запись в первую ступень и хранение информации производятся непрерывно, однако передача сигнала во вторую ступень на выходы запрещается уровнем логического нуля на входах синхронизации. Если же на входы синхронизации поступают короткие стробирующие импульсы, то текущее значение входного сигнала передается во вторую ступень и сохраняется на выходах до прихода следующего импульса (режим ступенчатой передачи). При уровне логической 1 на входах синхронизации осуществляется сквозная передача информации по всем четырем каналам.

Предварительное задание к эксперименту

1. Составить схему последовательного суммирующего счетчика на основе JK -триггеров с модулем счета, заданным в табл. 9.2. Для исключения избыточных состояний использовать комбинационные схемы на логических элементах 2И-НЕ и 3И-НЕ.

Таблица 9.2

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
Модуль счета	3	5	7	9	10	11	12	14

2. Составить таблицу переключений счетчика.

Порядок выполнения эксперимента

1. Ознакомиться с лабораторным стендом: найти на стенде источники логических сигналов (0 и 1) и импульсов (0-1, 1-0), индикаторы состояния выходов триггеров. Для получения параллельного четырехразрядного двоичного кода можно воспользоваться наборным полем на стенде «Логические элементы и комбинационные схемы».

2. Собрать схему четырехразрядного последовательного суммирующего счетчика на JK -триггерах ИС К155ТВ1 (см. рис. 9.1, а). Для индикации состояний триггеров выходы Q_4, Q_3, Q_2, Q_1 подключить к светодиодам. Установить счетчик в исходное состояние $Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_4 = 0$, подав с наборного поля на \bar{R} -входы сигнал нуля. От источника импульсов подать на вход счетчика 15 импульсов и составить таблицу переключений.

3. Собрать схему вычитающего счетчика, подключив прямые выходы триггеров к индикаторам, а инверсные выходы триггеров младших разрядов – на синхровходы триггеров последующих старших разрядов. Предусмотреть установку всех триггеров счетчика в исходное состояние $Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_4 = 1$. Проверить работу схемы, составить таблицу переключений вычитающего счетчика.

4. Собрать схему счетчика с заданным в предварительном задании модулем счета. Проверить работоспособность схемы и соответствие таблицы переключений.

5. Собрать схему двухразрядного параллельного счетчика на триггерах К155ТВ1 и ЛЭ К155ЛА4 (см. рис. 9.2). Проверить его работу.

6. Собрать схему четырехразрядного регистра сдвига на триггерах К155ТВ1 (см. рис. 9.5). Подать на J -вход прямой, на K -вход инверсный логические сигналы. На синхровходы C подать сигналы от источника импульсов. Исследовать работу регистра. Начертить временную диаграмму.

7. Проверить работу счетчика К155ИЕ7. В режиме счета на суммирование или вычитание подавать импульсы на соответствующий вход счетчика от их источника. В режиме предустановки параллельный код на информационные входы $D3, D2, D1, D0$ подать с наборного поля лабораторного стенда «Логические элементы и комбинационные схемы».

8. Ознакомиться с работой регистра памяти К155ТМ5. С шин наборного поля подать информацию (любое число в двоичном коде) на информационные входы D , а на разрешающие входы $C1-C2$ и $C3-C4$ подать «1». На выходы регистра подключить светодиоды. Изменяя информацию на D -входах, убедиться, что эта информация передается на выходы регистра. Поочередно подавая «0» на входы $C1-C2$ и $C3-C4$ определить, как будет работать регистр при изменении информации на D -входах.

9. Ознакомиться с работой регистра сдвига К155ИР1. В режиме параллельной записи ($V2 = 1$) подать с наборного поля на параллельные входы двоичный код 1010. Убедиться, что по срезу тактового импульса на входе $C2$ информация с параллельных входов запишется в регистр и появится на его выходах.

10. Установить режим последовательного сдвига информации в регистре К155ИР1 ($V2 = 0$). На последовательный вход $V1$ подать «1», на вход $C1$ подать нужное количество импульсов, чтобы в регистре записался код «1111». На вход $V1$ подать «0», и подать один импульс на вход $C1$. На выходе регистра должен появиться код «1110». Подать «1» на вход $V1$ и три импульса на вход $C1$. Записать код, который появится на выходе регистра.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Схема счетчика с заданным в табл. 9.1 модулем счета и таблица переключений его триггеров.
3. Схема четырехразрядного последовательного суммирующего счетчика на *JK*-триггерах (см. рис. 9.1, *a*) и таблица его переключений.
4. Схема двухразрядного параллельного счетчика (см. рис. 9.2).
5. Схема четырехразрядного регистра сдвига (см. рис. 9.5) и временные диаграммы его работы.
6. Временные диаграммы работы регистра памяти K155TM5 и регистра сдвига K155ИР1 в режиме последовательно-параллельного преобразователя.

Контрольные вопросы

1. Какие типы счетчиков Вы знаете?
2. Поясните работу суммирующего и вычитающего счетчиков.
3. Что такое реверсивный счетчик?
4. Как строятся параллельные счетчики?
5. Приведите примеры использования двоичных и декадных счетчиков.
6. Объясните принцип действия регистра памяти.
7. Какие способы используются для увеличения числа разрядов счетчиков и регистров?

Лабораторная работа № 10

ИССЛЕДОВАНИЕ НА ПЭВМ КАСКАДА УСИЛЕНИЯ НА БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ ПО СХЕМЕ ОЭ

Цель работы: изучение принципа работы усилительного каскада с ОЭ и исследование влияния элементов схемы на параметры и характеристики усилителя.

Общие сведения

Каскад усиления переменного тока по схеме ОЭ построен на биполярном транзисторе *n-p-n* (рис. 10.1). Расчет каскада сводится к выбору точки покоя на статической линии нагрузки, определению величин R_K и R_B по заданным параметрам нагрузки, например, $U_{\text{вых. м}}$ и R_H , и напряжению источника питания E_K .

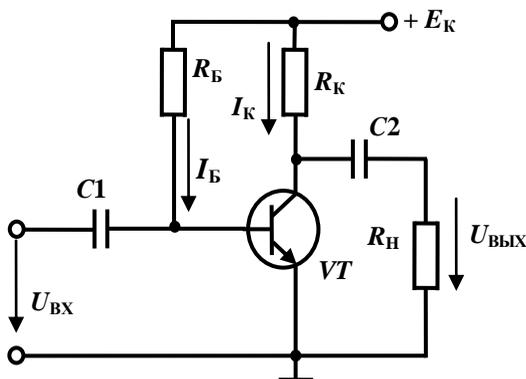


Рис. 10.1. Схема каскада на биполярном транзисторе

Выбранная точка покоя должна обеспечить требуемую величину тока в нагрузке, напряжения на нагрузке без нелинейных искажений и удовлетворять предельным параметрам транзистора.

Поэтому ток покоя

$$I_{\text{кп}} \geq I_{\text{нм}} = U_{\text{вых. м}} / R_H.$$

Напряжение покоя обычно выбирается $U_{кЭП} = E_{к} / 2$, чтобы обеспечить максимальное выходное напряжение без искажений.

Уравнение статической линии нагрузки

$$I_{к} = \frac{E_{к} - U_{кЭ}}{R_{к}}.$$

Линию нагрузки можно построить в координатах $I_{к}$, $U_{кЭ}$ по двум точкам. Одна из них – точка покоя П, координаты которой определены. Вторая может быть получена согласно уравнению – если принять $I_{к} = 0$, то $U_{кЭ} = E_{к}$. Построение статической линии нагрузки показано на рис. 10.2 (линия ab).

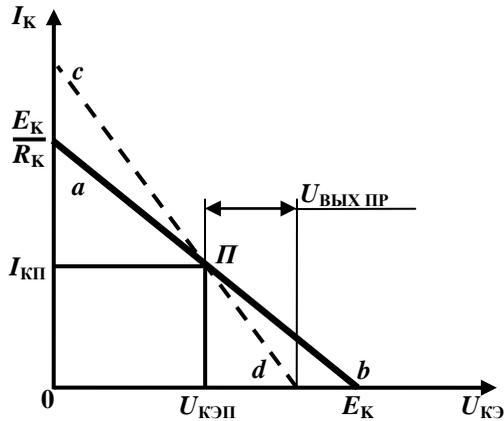


Рис. 10.2. Линии нагрузки каскада

Чтобы обеспечить заданный режим покоя, надо рассчитать величины $R_{к}$ и $R_{б}$:

$$R_{к} = \frac{E_{к} - U_{кЭП}}{I_{кП}};$$

$$R_{б} = \frac{E_{к} - U_{БЭП}}{I_{БП}}; I_{БП} = I_{кП} / h_{21}.$$

При работе каскада в режиме холостого хода и

$$i_{\text{вх}} = I_{\text{вх. м}} \sin \omega t$$

рабочая точка перемещается по статической линии нагрузки в обе стороны от точки покоя. Амплитуда переменной составляющей напряжения коллектор–эмиттер или равного ей выходного напряжения не может быть больше $E_{\text{к}} / 2$.

При работе каскада на нагрузку в коллекторную цепь параллельно $R_{\text{к}}$ включается $R_{\text{н}}$. Поэтому режим работы каскада меняется. Рабочая точка перемещается по динамической линии нагрузки, уравнение которой

$$\Delta u_{\text{кэ}} = \Delta i_{\text{кэ}} \frac{R_{\text{к}} R_{\text{н}}}{R_{\text{к}} + R_{\text{н}}}.$$

Динамическая линия нагрузки должна проходить через точку покоя П (частный случай – $\Delta i_{\text{кэ}} = 0$). Вторую точку можно получить, задавшись приращением $\Delta i_{\text{к}}$ и подсчитав изменение напряжения $\Delta U_{\text{кэ}}$ относительно координат точки покоя. Динамическая линия нагрузки показана на рис. 10.2 (c-d). Очевидно, что угол между осью $U_{\text{кэ}}$ и динамической линией нагрузки тем больше, чем меньше $R_{\text{н}}$ (при $R_{\text{н}} = 0$, он составит 90°). В связи с этим предельная амплитуда выходного напряжения $U_{\text{вых. пр}}$ с уменьшением $R_{\text{н}}$ становится меньше $E_{\text{к}} / 2$. Это может вызвать появление нелинейных искажений. Если заданное значение $U_{\text{вых. м}}$ больше, чем $U_{\text{вых. пр}}$, чтобы избежать нелинейных искажений, надо сместить точку покоя. Увеличивают $I_{\text{кп}}$ и анализ повторяют.

Динамические параметры каскада:

$$k_u = \frac{h_{21}}{h_{11}} \frac{R_{\text{к}} R_{\text{н}}}{(R_{\text{к}} + R_{\text{н}})};$$

$$k_i = h_{21} \frac{R_{\text{к}}}{R_{\text{к}} + R_{\text{н}}};$$

$$k_p = k_u k_i.$$

Предварительное задание к эксперименту

Транзистор каскада имеет следующие параметры: $h_{11} = 0,5$ кОм; $h_{21} = 25$; $h_{22} = 0,3$ мкСм; $h_{12} = 0$.

Напряжение база–эмиттер $U_{бэ}$ принять равным во всех режимах 0,6 В. Напряжением $U_{кэ}$ в режиме насыщения пренебречь. Напряжение источника питания $E_k = 12$ В.

1. Рассчитать величину R_k , которая обеспечит на холостом ходу ($R_H = \infty$) заданный в табл. 10.1 коэффициент усиления. Начертить в координатах I_k , $U_{кэ}$ линию нагрузки. Рассчитать сопротивление $R_б$, которое позволит получить максимальную амплитуду выходного напряжения $U_{вх. м}$, без искажений. Показать положение точки покоя на линии нагрузки и определить предельную величину $U_{вх. пр}$.

Таблица 10.1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
k_u	35	40	45	50	55	60	65	70
R_H , кОм	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0

2. Определить амплитуду входного напряжения $U_{вх. м}$, соответствующего определенному в п. 1 значению $U_{вх. пр}$.

3. Рассчитать при заданном в табл. 10.1 сопротивлении нагрузки R_H значения коэффициентов усиления k_u , k_p , k_i . Построить динамическую линию нагрузки и определить предельную величину $U_{вх. м}$, сравнить с предыдущими результатами.

4. Рассчитать амплитуду входного напряжения $U_{вх. м}$, позволяющего получить максимальное выходное напряжение без искажений.

5. Определить R_H , при котором k_p достигает максимального значения. Рассчитать это значение k_p .

Порядок выполнения эксперимента

Математическая модель каскада усиления реализована в программе LAB_UK.EXE. При запуске она иллюстрирует работу каскада при выбранных в качестве примера значениях R_k , $R_б$, R_H и $U_{вх. м}$, которые высвечиваются на экране монитора. На экран вы-

водятся линии нагрузки с указанием положения точки покоя, осциллограммы входного и выходного напряжений, значения коэффициентов усиления и параметры точки покоя. После нажатия клавиши «Ввод» изображается амплитудная характеристика каскада и программа переходит в диалоговый режим.

Ввод новых значений R_k , R_b , R_n и $U_{вх. м}$ производится в рамку, которая высвечивается у соответствующей величины. Перемещение рамки осуществляется с помощью клавиш «Вверх», «Вниз». После ввода данных нажать клавишу «Ввод».

1. Ввести рассчитанные значения R_k , R_b и $R_n = 1000$ кОм для режима холостого хода, $U_{вх} = 0,05$ В. Записать значение k_u , параметры режима покоя и начертить с экрана в масштабе амплитудную характеристику каскада. По характеристике определить $U_{вых. пр}$ и сравнить с результатом расчета предварительного задания.

2. Увеличить в 2 раза R_k . Записать значение k_u и нанести на предыдущий график амплитудную характеристику каскада в этом режиме. Объяснить изменения k_u .

3. Ввести рассчитанное значение R_k при заданном R_n . Записать значения k_u , k_p , k_i и сравнить с расчетными. На предыдущий график нанести амплитудную характеристику. Определить $U_{вых. пр}$. Сравнить с расчетным.

4. Ввести рассчитанную в п. 4 предварительного задания величину $U_{вх. м}$ и проверить отсутствие искажений. Перечертить с экрана осциллограммы входного и выходного напряжений.

5. Увеличить $U_{вх. м}$ в два раза, обратить внимание на появление нелинейных искажений. Перечертить осциллограммы входного и выходного напряжений.

6. Изучить влияние R_b на форму $U_{вых}$, для чего ввести при первоначальном значении $U_{вх. м}$ значения R_b , равные $0,6R_b$ и $2,0R_b$ от расчетного. Перечертить осциллограммы входного и выходного напряжений. Объяснить причины появления нелинейных искажений.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Схема исследуемого каскада.
3. Расчет предварительного задания.

4. Значения коэффициентов усиления, амплитудные характеристики и осциллограммы по каждому пункту выполненного эксперимента.

5. Краткие выводы.

Контрольные вопросы

1. Объяснить принцип работы каскада усиления, назначение основных элементов схемы.

2. Какими параметрами характеризуется усилитель?

3. Какое влияние на параметры каскада оказывает R_k ?

4. Что такое нелинейные искажения и причина их появления?

5. Можно ли получить неискаженный выходной сигнал, если заданное $U_{\text{вых. т}} > E_k / 2$?

6. Какое влияние оказывает R_b на положение точки покоя?

7. Всегда ли нужно выбирать $U_{\text{кэп}} \approx E_k / 2$?

ЛИТЕРАТУРА

1. Горбачев, Г. Н. Промышленная электроника : учебник для вузов / Г. Н. Горбачев, Е. Е. Чаплыгин. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 320 с.
2. Забродин, Ю. С. Промышленная электроника : учебник для вузов / Ю. С. Забродин. – М. : Высшая школа, 1982. – 496 с.
3. Сборник задач по электротехнике и электронике : учебное пособие / Ю. В. Бладыко [и др.]; под общ. ред. Ю. В. Бладыко. – Минск : Вышэйшая школы, 2013. – 478 с.
4. Гусев, В. Г. Электроника и микропроцессорная техника : учебник для вузов / В. Г. Гусев, Ю.М. Гусев. – М. : Высшая школа, 2005. – 790 с.
5. Опадчий, Ю. Ф. Аналоговая и цифровая электроника (полный курс) : учебник для вузов / Ю. Ф. Опадчий, О. П. Глудкин, А. И. Гуров. – М. : Горячая линия – Телеком, 2005. – 768 с.
6. Прянишников, В. А. Электроника : полный курс лекций / В. А. Прянишников. – СПб. : КОРОНА принт, 2004. – 415 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа № 1. Исследование полупроводниковых диодов и тиристоров.....	3
Лабораторная работа № 2. Исследование биполярного и полевого транзисторов.....	13
Лабораторная работа № 3. Исследование однофазных выпрямителей с фильтрами.....	23
Лабораторная работа № 4. Исследование стабилизаторов постоянного напряжения и тока.....	36
Лабораторная работа № 5. Исследование операционного усилителя.....	44
Лабораторная работа № 6. Логические функции и микросхемы.....	63
Лабораторная работа № 7. Комбинационные логические схемы.....	71
Лабораторная работа № 8. Исследование триггерных схем.....	81
Лабораторная работа № 9. Счетчики импульсов и регистры.....	90
Лабораторная работа № 10. Исследование на ПЭВМ каскада усиления на биполярном транзисторе по схеме ОЭ.....	102
Литература	108

Учебное издание

БЛАДЫКО Юрий Витальевич
МИХАЛЬЦЕВИЧ Георгий Александрович
ЖУКОВСКАЯ Татьяна Евгеньевна и др.

ПРАКТИКУМ ПО ЭЛЕКТРОНИКЕ

Пособие
для студентов специальностей
1-43 01 01 «Электрические станции»,
1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети»,
1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)»,
1-43 01 09 «Релейная защита и автоматика»

В 2 частях

Часть 1

Редактор *Е. И. Бенищевич*
Компьютерная верстка *Е. А. Беспанской*

Подписано в печать 09.03.2022. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 6,39. Уч.-изд. л. 5,00. Тираж 300. Заказ 486.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.