

Федеральное агентство железнодорожного транспорта
Уральский государственный университет путей сообщения
Кафедра «Электрические машины»

Ю. В. Новоселов
Г. Л. Штрапенин

ЭЛЕКТРОНИКА И СХЕМОТЕХНИКА

Методические указания к выполнению лабораторных работ
для студентов специальностей

190901 — «Системы обеспечения движения поездов»

090900.62 — «Информационная безопасность»

220400.62 — «Управление в технических системах
на железнодорожном транспорте»

Екатеринбург
УрГУПС
2015

УДК 656.25.52
Н76

Новоселов, Ю. В.

Н76 Электроника и схемотехника : метод. указания к проведению лабораторных работ / Ю. В. Новоселов, Г. Л. Штрапенин. — Екатеринбург : УрГУПС, 2015. — 88 с.

Методические указания предназначены для проведения лабораторных занятий по курсу «Электроника и схемотехника» для студентов, обучающихся по направлению 090900.62 — «Информационная безопасность», и по курсу «Физические основы электроники» направления 220.400.62 — «Управление в технических системах на железнодорожном транспорте», а также по специальности 19090102 — «Системы обеспечения движения поездов».

Содержат необходимые теоретические сведения, порядок выполнения лабораторных работ и отчетов по ним.

Могут быть использованы студентами всех форм обучения. Соответствуют требованиям рабочих программ учебных дисциплин и ФГОС.

УДК 656.25.52

*Опубликовано по решению
редакционно-издательского совета университета*

Авторы: Ю. В. Новоселов, доцент кафедры «Электрические машины», канд. техн. наук, УрГУПС

Г. Л. Штрапенин, доцент кафедры «Электрические машины», канд. физ.-мат. наук, УрГУПС

Рецензент: Б. С. Сергеев, профессор кафедры «Электрические машины», д-р техн. наук, УрГУПС

Учебное издание

**Новоселов Юрий Викторович
Штрапенин Геннадий Львович**

ЭЛЕКТРОНИКА И СХЕМОТЕХНИКА

Редактор *С. В. Пилюгина*

Верстка *Н. А. Журавлевой*

Подписано в печать 13.03.15. Формат 60х84/16.

Усл. печ. л. 5,1. Тираж 50 экз. Заказ 80.

УрГУПС

620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66

© Уральский государственный университет
путей сообщения (УрГУПС), 2015

Оглавление

Введение	4
Лабораторная работа 1	
Исследование полупроводниковых выпрямительных диодов.....	5
Лабораторная работа 2	
Исследование стабилитронов.....	19
Лабораторная работа 3	
Исследование биполярного транзистора	23
Лабораторная работа 4	
Исследование полевого транзистора.....	34
Лабораторная работа 5	
Исследование электронных ключей	44
Лабораторная работа 6	
Исследование триггера Шмитта.....	57
Лабораторная работа 7	
Исследование автоколебательного мультивибратора	65
Лабораторная работа 8	
Исследование ждущего мультивибратора на интегральных микросхемах ...	70
Лабораторная работа 9	
Исследование счетчиков импульсов и регистров сдвига	75
Библиографический список	88

Методические указания предназначены для выполнения лабораторных работ по курсу «Электроника и схемотехника» для студентов, обучающихся по направлению 090900.62 – «Информационная безопасность», и по курсу «Физические основы электроники» направления 220.400.62 – «Управление в технических системах на железнодорожном транспорте», а также по специальности 19090102 – «Системы обеспечения движения поездов», содержат необходимые теоретические сведения, порядок выполнения лабораторных работ и отчетов по ним. Могут быть использованы студентами как дневной, так и заочной формы обучения.

Методика проведения лабораторных работ ориентирована на использование программы моделирования электронных схем *Multisim 10*, разработанной фирмой *National Instruments*. Это позволяет варьировать в широких пределах задания, выдаваемые студентам при проведении лабораторных занятий, и тем самым повысить качество обучения. Кроме того, появляется возможность выполнения лабораторных работ при дистанционном и заочном обучении в компьютерных классах или на персональных компьютерах. Следует отметить, что, хотя замена изучения реальных электронных устройств их компьютерным моделированием не позволяет студентам получить навыки работы с реальными электронными компонентами и измерительными приборами, в реально существующей ситуации использование соответствующих компьютерных программ с адекватными математическими моделями электронных компонентов существенно повышает эффективность учебного процесса при нестационарных формах обучения.

В процессе выполнения лабораторных работ формируются и развиваются профессиональные компетенции, предусмотренные ФГОС.

Лабораторная работа 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ ДИОДОВ

1.1. Цель работы: изучение физических основ работы полупроводниковых выпрямительных диодов, экспериментальное исследование их вольтамперных характеристик и определение основных параметров.

1.2. Теоретические сведения

1.2.1. Собственные и примесные полупроводники

Полупроводники занимают промежуточное положение по электрической проводимости между металлами и диэлектриками. У металлов удельное электрическое сопротивление $\rho < 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}$, у диэлектриков $\rho > 10^{10} \text{ Ом} \cdot \text{см}$, а у полупроводников может находиться в пределах от $10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ до $10^{10} \text{ Ом} \cdot \text{см}$. К полупроводникам относят четырехвалентные элементы периодической таблицы Менделеева, такие как германий, кремний, фосфор, бор и другие. Особенностью атомов этих элементов является наличие четырех валентных электронов, занимающих в атоме орбиты с определенными разрешенными уровнями энергии. Соответствующая энергетическая зона называется разрешенной валентной зоной. Расположенная над ней разрешенная энергетическая зона называется зоной проводимости. Между валентной зоной и зоной проводимости расположена запрещенная зона. Взаимное расположение этих зон отображено на энергетической диаграмме (рис. 1.1).

При температуре абсолютного нуля валентная зона полностью заполнена электронами, а зона проводимости пуста. При повышении температуры часть валентных электронов, получая дополнительную энергию, превышающую ширину запрещенной зоны ΔW , может перейти в зону проводимости, т. е. стать свободными электронами. Атом приобретает положительный заряд, соответствующий незанятой валентной связи, называемый дыркой. Так образуется пара разноименных зарядов — электрон и дырка. Процесс их образования называется генерацией пар свободных носителей зарядов. Под действием различных факторов электроны и дырки могут хаотично перемещаться по объему материала. Если при таком перемещении электрон

встречает незанятую валентную связь, то он может ее занять, при этом исчезает пара зарядов, и процесс называется рекомбинацией свободных носителей зарядов. При рекомбинации выделяется энергия, соответствующая ширине запрещенной зоны. Процессы генерации и рекомбинации протекают в материале непрерывно и при данной температуре уравнивают друг друга.

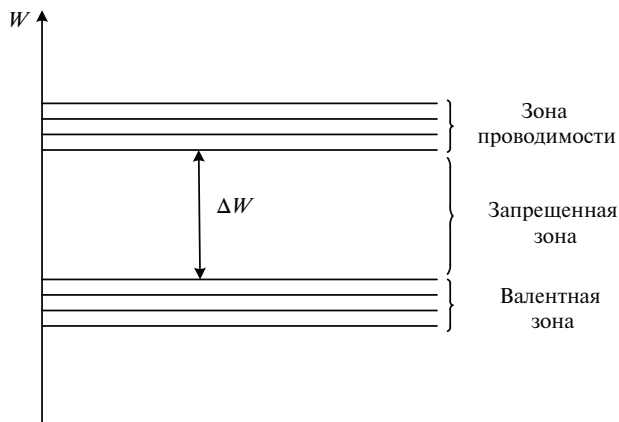


Рис. 1.1. Энергетическая диаграмма атома

Ширина запрещенной зоны определяет принадлежность материала к металлам, диэлектрикам или полупроводникам. У металлов ширина запрещенной зоны очень мала или она вовсе отсутствует, поэтому в металлах большое количество свободных зарядов, что обеспечивает их высокую электрическую проводимость. У диэлектриков ширина запрещенной зоны превышает 3 эВ, поэтому концентрация свободных зарядов в них крайне мала, а электропроводность низкая. Ширина запрещенной зоны в полупроводниках составляет от нескольких десятых долей эВ до 3 эВ. Так, у германия (*Ge*) $\Delta W = 0,72$ эВ, у кремния (*Si*) $\Delta W = 1,11$ эВ.

Идеально чистые, без примесей, полупроводники, атомы которых образуют правильную кристаллическую решетку без изъянов, называются собственными полупроводниками. Проводимость собственных полупроводников зависит от ширины запрещенной зоны, т. е. от вида полупроводника. При повышении температуры число свободных зарядов увеличивается и проводимость растет. При заданной

температуре в полупроводнике существует определенная концентрация электронов и дырок, которая носит название собственной концентрации; концентрации электронов n_i и дырок p_i равны $n_i = p_i$. Собственная концентрация при комнатной температуре мала, но при повышении температуры до некоторого критического уровня она может сильно увеличиться, и это является причиной нарушения работоспособности полупроводниковых устройств. Собственные полупроводники в чистом виде не используются, но являются основой для получения примесных полупроводников, на базе которых изготавливаются все полупроводниковые приборы.

Примесные полупроводники получают путем введения в собственный полупроводник примесей определенного вида, которые существенно влияют на проводимость полупроводникового материала. В зависимости от характера примеси различают полупроводники с электронной проводимостью (n -типа) и с дырочной проводимостью (p -типа). При введении в собственный полупроводник пятивалентной примеси, называемой донорной, например фосфора P , сурьмы Sb , мышьяка As , атом примеси за счет четырех валентных электронов образует ковалентные связи с собственными атомами, а пятый электрон атома примеси оказывается слабо связан с атомом, достаточно сообщить ему малую дополнительную энергию активации для того, чтобы он перешел в зону проводимости, т. е. стал свободным зарядом. Атом примеси становится неподвижным положительным ионом, связанным с кристаллической решеткой. При комнатной температуре все атомы примеси оказываются ионизированными. Концентрация примеси такова, что количество свободных электронов возрастает в тысячи раз по сравнению с собственной концентрацией. Проводимость полупроводника обеспечивается, таким образом, за счет электронов. Такая примесь называется донорной, а полупроводник с электронной проводимостью — полупроводником n -типа. Одновременно протекает процесс генерации электронов и дырок из собственных атомов. Так как концентрация электронов в примесном полупроводнике n -типа оказывается намного больше концентрации дырок, то электроны называются основными, а дырки — неосновными носителями зарядов. В отличие от собственного полупроводника, в примесном полупроводнике проводимость обеспечивается носителями заряда одного знака.

При введении в собственный полупроводник трехвалентной примеси, называемой акцепторной, например индия In или бора B , атом примеси захватывает недостающий для образования ковалентной

связи электрон из атома основного полупроводника. За счет этого образуется дополнительное количество дырок, концентрация которых при комнатной температуре равна практически концентрации атомов примеси. Атомы примеси становятся неподвижными отрицательными ионами, связанными с кристаллической решеткой полупроводника. Такая примесь называется акцепторной, а полупроводник — p -типа. Дырки являются основными носителями заряда, а электроны — неосновными.

В примесных полупроводниках количество основных носителей определяется концентрацией примеси, а количество неосновных носителей обусловлено температурой либо другими факторами, вызывающими генерацию свободных носителей заряда из собственных атомов, например воздействием света, электрического поля и пр. Следует отметить, что при значительном повышении температуры концентрация неосновных носителей может сравняться с концентрацией основных носителей, что приведет к нарушению функционирования полупроводниковых приборов, работа которых основана на использовании примесных полупроводников.

В равновесном состоянии движение свободных носителей зарядов в полупроводниках носит хаотический характер, но при определенных условиях это движение становится упорядоченным, заряды двигаются в определенном направлении. Основными видами направленного движения являются диффузионное и дрейфовое движение зарядов.

Диффузионное движение обусловлено различной концентрацией носителей зарядов одного знака по пространственной координате, т. е. градиентом концентрации. Движение зарядов будет носить направленный характер из области с большой концентрацией в область с малой концентрацией, возникает диффузионный ток электронов или дырок. Это движение направлено на выравнивание концентрации зарядов по объему материала. Интенсивность диффузионного тока пропорциональна величине градиента концентрации.

Дрейфовое движение свободных зарядов возникает при воздействии на полупроводник электрического поля, появляется направленный по вектору поля дрейфовый ток свободных зарядов, величина которого зависит от напряженности поля. Диффузионный и дрейфовый токи могут существовать в полупроводнике одновременно, причем каждый из них может содержать электронную и дырочную составляющие.

1.2.2. Электронно-дырочный переход в равновесном состоянии

Контакт примесных полупроводников с разным типом проводимости называется электронно-дырочным переходом, или p - n -переходом. Для соединения p - и n -полупроводников используются различные технологии: сплавная, диффузионная, эпитаксиальная и др. При соединении двух областей с разным типом проводимости образуется разность концентраций электронов и дырок. Действительно, в n -области концентрация электронов, как основных носителей заряда, велика, а в p -области — мала, так как там они являются неосновными носителями. Аналогично возникает разность концентраций дырок. За счет градиента концентраций возникают встречные диффузионные токи электронов и дырок через границу p - и n -областей. Встречаясь в области границы, электроны и дырки взаимно рекомбинируют, в результате чего уменьшается концентрация свободных зарядов вблизи границы. В связи с этим в p -области возникает слой нескомпенсированных отрицательных зарядов ионов акцепторных атомов, а в n -области — слой нескомпенсированных положительных ионов донорных атомов. Эти заряды создают электрическое поле, под влиянием которого возникает дрейфовый ток неосновных зарядов, а именно — дырок из p -области в n -область и электронов из n -области в p -область. В то же время электрическое поле препятствует диффузионному движению зарядов. Процессы диффузионного и дрейфового движения зарядов уравниваются, что соответствует равновесному состоянию p - n -перехода. Электрические заряды в слое вблизи границы областей обусловлены положительными и отрицательными ионами примесных атомов и являются неподвижными, так как атомы примесей связаны кристаллической решеткой. Концентрация свободных зарядов в этом слое мала, поэтому он имеет большое электрическое сопротивление и называется запирающим слоем.

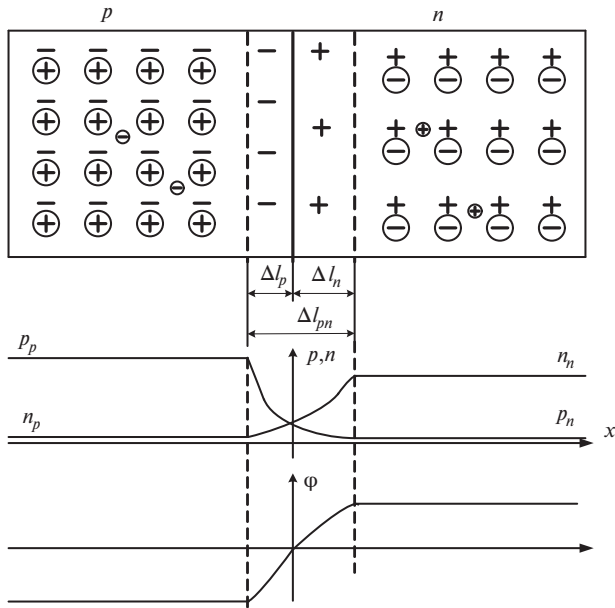
На рис. 1.2 изображена схематично структура p - n -перехода в равновесном состоянии, когда к нему не приложено внешнее напряжение, и диаграммы, показывающие изменение по толщине перехода концентраций дырок и электронов p_p, p_n, n_p, n_n и электрического потенциала φ .

Наличие зарядов акцепторных и донорных атомов в запирающем слое приводит к появлению электрических потенциалов p - и n -областей отрицательного φ_p в p -области и положительного φ_n в n -области. Разность этих потенциалов $U_k = \varphi_n - \varphi_p$ называется контактной разностью потенциалов и в большой степени определяет свойства полупроводниковых приборов. Контактная разность потенциалов в основном зависит от собственной концентрации

и концентраций примесей в p - и n -областях. Эта зависимость отражена в следующей формуле:

$$U_{\kappa} = \frac{\kappa T}{e} \ln \frac{n_n n_p}{n_i^2}, \quad (1.1)$$

где $\kappa = 8,6 \cdot 10^{-5}$ Дж/к – постоянная Больцмана,
 $T^{\circ}\text{К}$ – абсолютная температура,
 e – заряд электрона.



Условные обозначения зарядов

- \oplus – дырки как основные носители
- \ominus – электроны как основные носители
- \oplus – дырки как неосновные носители
- \ominus – электроны как неосновные носители
- – отрицательные ионы акцепторных атомов
- +

Рис. 1.2. Структура p - n -перехода в равновесном состоянии

Важным параметром p - n -перехода является также толщина запирающего слоя и соотношение ее составляющих в p - и n -областях. Для объяснения свойств различных полупроводниковых приборов важным является следующее выражение:

$$\frac{\Delta l_p}{\Delta l_n} = \frac{N_d}{N_a}, \quad (1.2)$$

где Δl_p и Δl_n — составляющие толщины запирающего слоя соответственно в p - и n -областях;

N_d и N_a — концентрации донорной и акцепторной примесей.

Такую обратную пропорцию легко объяснить тем, что при возрастании концентрации примесей растет и концентрация основных носителей заряда, при этом рекомбинация электронов и дырок происходит на меньшем пути пробега зарядов при их диффузии в смежные области.

1.2.3. Прямое и обратное включение p - n -перехода

Возможны два варианта включения p - n -перехода — прямое и обратное. При прямом включении плюс внешнего источника напряжения подключается к p -области (аноду), а минус — к n -области (катоду), как это показано на рис. 1.3.

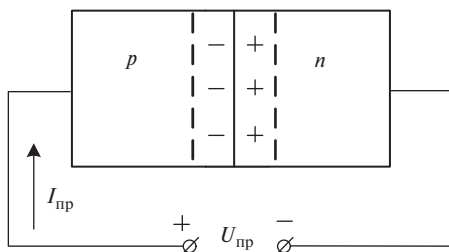


Рис. 1.3. Прямое включение p - n -перехода

Так как электрическое сопротивление областей вне запирающего слоя мало, то внешнее напряжение оказывается подключенным к запирающему слою встречно контактной разности потенциалов. Напряженность электрического поля в запирающем слое уменьшается, это приводит к уменьшению дрейфового тока и увеличению диффузионного тока. Равновесие нарушается и через переход будет протекать прямой ток $I_{пр}$, который создается основными

носителями зарядов. В связи с большой концентрацией основных носителей прямой ток имеет значительную величину. При увеличении прямого напряжения до величины контактной разности потенциалов запирающий слой исчезает, электрическое сопротивление полупроводниковой структуры значительно падает, и при дальнейшем увеличении прямого напряжения нарастание прямого тока происходит быстрее.

При обратном включении минус внешнего источника напряжения подключается к p -области, а плюс — к n -области (рис. 1.4).

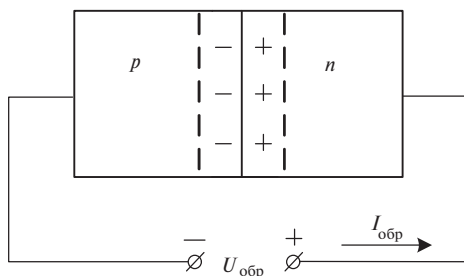


Рис. 1.4. Обратное включение p - n -перехода

Полярности внешнего напряжения и контактной разности потенциалов совпадают, напряженность электрического поля в запирающем слое увеличивается, что приводит к увеличению дрейфового тока, создаваемого неосновными носителями заряда, и к уменьшению диффузионного тока. Так как концентрация неосновных носителей заряда на несколько порядков ниже по сравнению с основными носителями, то обратный ток $I_{обр}$ во много раз меньше прямого тока.

1.2.4. Вольт-амперная характеристика p - n -перехода

Вольтамперная характеристика (ВАХ) p - n -перехода существенно нелинейна в связи с большой разницей прямого и обратного тока через переход. Это значит, что при прямом включении сопротивление перехода мало по сравнению с обратным включением. В зависимости от применяемых полупроводниковых материалов и конструкции полупроводниковых приборов, в которых используются p - n -переходы, прямое сопротивление может составлять от единиц до десятков и сотен Ом, а обратное сопротивление — от десятков кОм до десятков и сотен МОм.

Прямая ветвь ВАХ существенно нелинейна. Начальный участок имеет пологий характер, а переход к крутому участку происходит при возрастании прямого напряжения до величины контактной разности потенциалов. Обратная ветвь ВАХ имеет небольшой наклон по отношению к оси абсцисс, что объясняется малой величиной обратного тока. Вид вольт-амперной характеристики p - n -перехода показан на рис. 1.5.

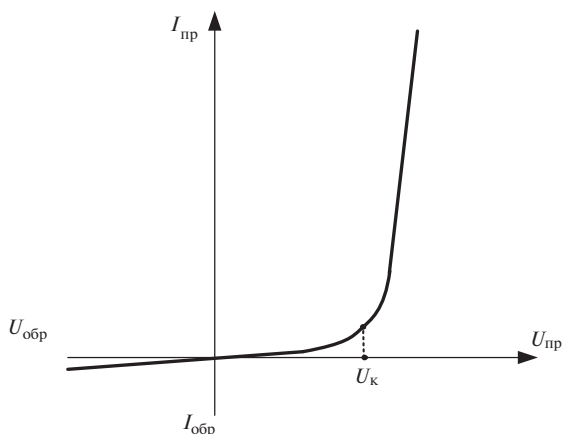


Рис. 1.5. Вольтамперная характеристика p - n -перехода

Форма и расположение прямых и обратных ветвей ВАХ существенно зависит от применяемых полупроводниковых материалов. Наиболее показательно сравнение таких материалов, как германий (Ge) и кремний (Si).

Ширина запрещенной зоны у германия составляет 0,72 эВ, а у кремния — 1,11 эВ. Поэтому концентрация неосновных носителей заряда в германии на несколько порядков больше, чем у кремния, и величина обратного тока достаточно большая по сравнению с кремнием, отличающимся малой концентрацией неосновных носителей заряда. Существенны также различия в прямых ветвях ВАХ. Контактная разность потенциалов у германиевого перехода составляет примерно 0,2...0,4 В, а у кремниевого — 0,6...0,8 В. Поэтому прямая ветвь ВАХ кремниевого перехода располагается значительно правее по сравнению с германиевым.

Следует отметить, что полупроводниковые диоды с использованием p - n -перехода имеют значительную инерционность, что связано

с процессами накопления избыточных неосновных носителей заряда в приграничных областях при подаче прямого напряжения и их рассасывания при выключении прямого напряжения. Процессы накопления и рассасывания избыточных зарядов занимают определенное время, это ограничивает быстроедействие таких диодов.

1.2.5. Переход «металл-полупроводник» (переход Шоттки)

Наряду с электронно-дырочным переходом в полупроводниковой техники широко применяется переход «металл-полупроводник», получивший свое название по имени немецкого ученого Шоттки, исследовавшего переход. Процессы в таких переходах связаны с так называемой работой выхода электронов из металла и полупроводника. Чем меньше работа выхода, тем больше электронов может выйти из данного тела. В полупроводниковых диодах используется обычно контакт *n*-кремния с металлом (золотом, вольфрамом или другим металлом). Выпрямляющие свойства контакта обеспечиваются в случае, если работа выхода электронов из полупроводника меньше, чем из металла. Поэтому преобладающим будет выход электронов из полупроводника в металл, и в приграничном слое полупроводника образуется область, обедненная электронами и заряженная положительно за счет нескомпенсированных ионов донорных атомов. Приграничный слой металла приобретет отрицательный поверхностный заряд избыточных электронов. Таким образом, в обедненном слое полупроводника создается электрическое поле, препятствующее переходу электронов из полупроводника в металл, и такой контакт находится в равновесии. Схематично это показано на рис. 1.6. Если к переходу «металл-полупроводник» приложить прямое напряжение (плюс к металлу, минус к полупроводнику), то потенциальный барьер, препятствующий переходу электронов из полупроводника в металл, понижается, начинает протекать прямой ток, создаваемый этими электронами. При обратном включении (минус к металлу, плюс к полупроводнику) напряженность электрического поля в запирающем слое увеличивается, начинает протекать обратный ток, создаваемый электронами, переходящими из металла в полупроводник.

Особенностью диодов Шоттки является их малая инерционность, так как отсутствуют процессы накопления и рассасывания избыточных неосновных носителей заряда, как это происходит в *p-n*-переходах. Кроме того, падение напряжения на диодах Шоттки при прямом включении достаточно мало и составляет величину 0,2...0,3 В.

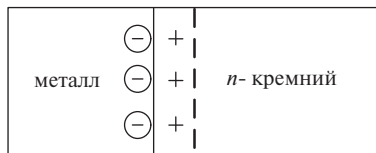


Рис. 1.6. Выпрямляющий контакт металл-полупроводник в равновесном состоянии

1.3. Основные параметры полупроводниковых выпрямительных диодов

1.3.1. Электрические параметры:

- постоянное прямое напряжение $U_{пр}$ при заданном токе;
- постоянный обратный ток $I_{обр}$ при заданном обратном напряжении;
- емкость диода C_d .

1.3.2. Предельные эксплуатационные данные:

- постоянное обратное напряжение $U_{обр. max}$;
- постоянный или средний выпрямленный ток $I_{пр. max}$;
- температура окружающей среды.

Для характеристики свойств выпрямительных диодов используются также прямые и обратные статические и дифференциальные сопротивления, которые определяются на крутом участке прямой ветви ВАХ и на обратной ветви при заданном обратном напряжении. Эти сопротивления характеризуют выпрямительные свойства диодов.

1.4. Порядок выполнения работы

1.4.1. Ознакомьтесь с паспортными данными диодов.

1.4.2. Соберите схему для снятия прямой ветви ВАХ (рис. 1.7). Установите в схему диод, тип которого задается преподавателем.

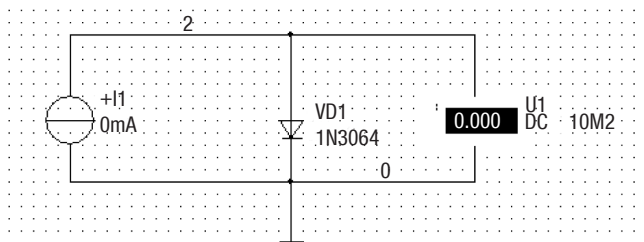


Рис.1.7. Схема для снятия прямой ветви ВАХ

1.4.3. Задавая прямой ток через диод в соответствии с табл. 1.1, снимите прямую ветвь ВАХ, отсчитывая величину прямого напряжения по вольтметру. Результаты измерений занесите в табл. 1.1.

1.4.4. Установите диод Шоттки, тип которого указывается преподавателем, и повторите измерения. Результаты занесите в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Тип диода	$I_{пр}, \text{мА}$	0	0,02	0,05	0,1	0,2	0,5	1	2	4	6	8	10
.....	$U_{пр}, \text{В}$												
.....													

1.4.5. Соберите схему для снятия обратной ветви ВАХ (рис. 1.8), установите кремниевый диод того же типа, что и при снятии прямой ветви ВАХ.

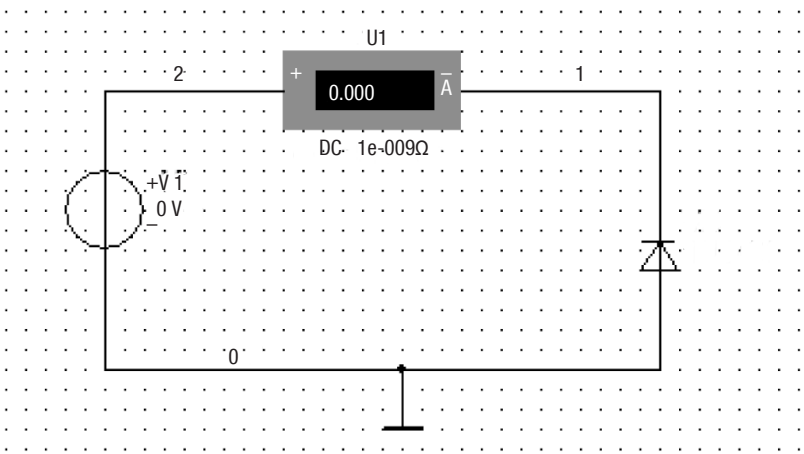


Рис. 1.8. Схема для снятия обратной ветви ВАХ

1.4.6. Задавайте обратные напряжения в соответствии с табл. 1.2 и отсчитывайте величину обратного тока с помощью амперметра. Напряжение следует увеличивать до тех пор, пока обратный ток не увеличится до напряжения пробоя, что можно заметить по резкому увеличению обратного тока. Результаты занесите в табл. 1.2.

1.4.7. Опыт повторите для диода Шоттки. Результаты занесите в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Тип диода	$U_{обр}, В$	0	5	10	20	40	80	$U_{проб}$
.....	$I_{обр}, мкА$									
.....										

1.5. Обработка результатов измерений

1.5.1. Постройте на одном графике прямые и обратные ветви ВАХ для обоих типов диодов. Масштабы на положительных и отрицательных полуосях выбирайте с учетом полученных значений токов и напряжений.

1.5.2. Пользуясь графиками ВАХ, определите прямые и обратные статические и дифференциальные сопротивления диодов. Прямые сопротивления рассчитывайте, выбирая точки для расчета на крутых участках ВАХ, так как эти участки являются рабочими для выпрямительных диодов.

1.5.3. Определите электрические параметры диодов: прямые напряжения при максимальном прямом токе; обратные токи при максимальном обратном напряжении, не превышающем напряжения пробоя; напряжение пробоя.

1.6. Содержание выводов

1.6.1. Сравните опытные параметры с паспортными и сделайте вывод об их соответствии или несоответствии.

1.6.2. Объясните вид характеристик с учетом теории.

1.6.3. Объясните причины различий вольтамперных характеристик для исследуемых типов диодов.

1.7. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- цель работы;
- паспортные данные диодов;
- схемы для снятия вольтамперных характеристик;
- таблицы с результатами измерений;
- вольтамперные характеристики диодов;
- расчеты прямых и обратных сопротивлений;

- параметры диодов, определенные по опытным данным;
- выводы.

1.8. Контрольные вопросы

- 1.8.1. Что такое собственные и примесные полупроводники?
- 1.8.2. Что такое дрейфовый и диффузионный токи?
- 1.8.3. Каков механизм образования запирающего слоя?
- 1.8.4. Чем вызвано образование контактной разности потенциалов?
- 1.8.5. Какие процессы протекают в p - n -переходе при прямом и обратном включении?
- 1.8.6. Объясните, на чем основаны выпрямительные свойства полупроводниковых диодов.
- 1.8.7. Объясните характер вольт-амперных характеристик p - n -перехода.
- 1.8.8. Каков принцип действия перехода «металл-полупроводник»?
- 1.8.9. Чем объяснить различия в ВАХ p - n -переходов, выполненных из разных полупроводниковых материалов?
- 1.8.10. Перечислите основные параметры выпрямительных диодов.

Лабораторная работа 2

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛИТРОНОВ

2.1. Цель работы: ознакомление с физическими основами работы стабилитронов, снятие их вольт-амперных характеристик и определение параметров.

2.2. Основные теоретические сведения

Кремниевые стабилитроны — это разновидность полупроводниковых диодов, предназначенных для стабилизации напряжения. Стабилитроны используются в стабилизированных источниках питания, схемах формирования импульсов, для фиксации уровня напряжений и в других устройствах, требующих стабильных напряжений. Основное свойство стабилитронов — малая зависимость падающего на них напряжения от протекающего тока. В стабилитронах для этого используется обратная ветвь вольтамперной характеристики на участке электрического пробоя, Электрический, или лавинный, пробой наблюдается в кремниевых переходах, обладающих большой толщиной запирающего слоя и малой концентрацией неосновных носителей заряда. Лавинный пробой возникает при определенной величине обратного напряжения, создающего сильное электрическое поле в запирающем слое. Под действием поля неосновные носители — электроны — ускоряются и приобретают большую кинетическую энергию, достаточную для ударной ионизации атомов кремния, что приводит к образованию новых свободных электронов. Такой процесс образования свободных носителей заряда приобретает лавинный характер, при этом обратный ток резко возрастает при малых приращениях обратного напряжения. Это явление носит название лавинного (электрического) пробоя. Лавинный пробой имеет обратимый характер, если обратный ток не возрастет до такой величины, при которой начнется необратимый тепловой пробой, приводящий к выходу стабилитрона из строя. Прямая ветвь вольт-амперной характеристики стабилитрона имеет обычный для кремниевых переходов вид. Типичный вид прямой и обратной ветвей вольт-амперной характеристики стабилитрона показан на рис. 2.1.

Основные параметры стабилитронов:

- номинальное напряжение стабилизации $U_{\text{ст}}$ и допустимые разбросы этого напряжения;

- дифференциальное (динамическое) сопротивление R_d на рабочей (обратной) ветви ВАХ;
- постоянное прямое напряжение U_{np} при заданном прямом токе;
- температурный коэффициент напряжения стабилизации;
- минимальный ток стабилизации $I_{ст.min}$;
- максимальный ток стабилизации $I_{ст.max}$.

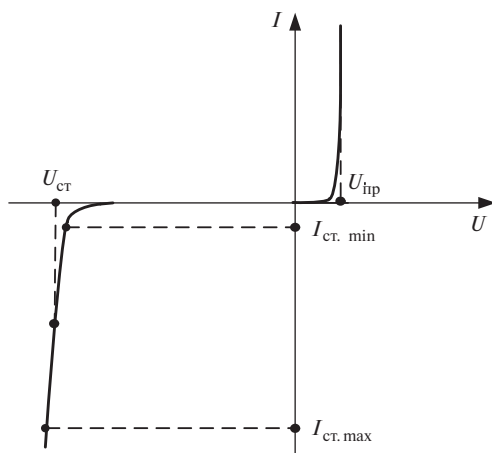


Рис. 2.1. Вольт-амперная характеристика стабилитрона

2.3. Порядок выполнения работы

2.3.1. Ознакомьтесь с паспортными данными стабилитрона (тип стабилитрона указывается преподавателем).

2.3.2. Соберите схему для снятия прямой ветви вольт-амперной характеристики (рис. 2.2).

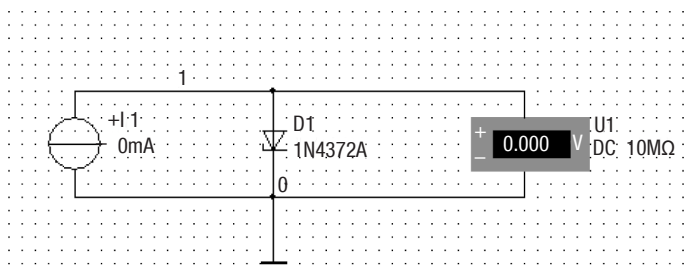


Рис. 2.2. Схема для снятия прямой ветви ВАХ стабилитрона

2.3.3. Устанавливайте значения прямого тока в соответствии с табл. 2.1 и измеряйте соответствующие значения прямого напряжения на стабилитроне. Результаты занесите в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Тип стабилитрона	$I_{пр}$, мА	0	0,02	0,05	0,1	0,2	0,5	1	2	4	6	8	10
.....	$U_{пр}$, В												

2.3.4. Соберите схему для снятия обратной ветви ВАХ стабилитрона (рис. 2.3) и установите тот же тип стабилитрона, что и в предыдущем опыте.

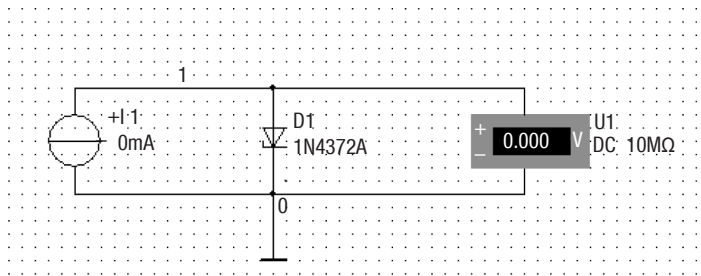


Рис. 2.3. Схема для снятия обратной ветви ВАХ стабилитрона

2.3.5. Устанавливайте обратный ток с помощью источника тока в соответствии с табл. 2.2 и фиксируйте величину обратного напряжения на стабилитроне. Результаты записывайте в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Тип стабилитрона	$I_{обр}$, мА	0	0,02	0,05	0,1	0,2	0,5	1	2	4	6	8	10
.....	$U_{обр}$, В												

2.4. Обработка результатов измерений

2.4.1. Постройте прямую и обратную ветви ВАХ стабилитрона.

2.4.2. Пользуясь графиком ВАХ и таблицей, определите параметры стабилитрона:

- напряжение стабилизации при токе стабилизации 5 мА;
- минимальный ток стабилизации, соответствующий началу устойчивого пробоя;
- дифференциальное (динамическое) сопротивление при токе стабилизации 5 мА;
- прямое напряжение при прямом токе 10 мА.

2.5. Содержание выводов

2.5.1. Сравните опытные параметры с паспортными и сделайте выводы о их соответствии.

2.5.2. Поясните формулу полученной ВАХ с учетом принципа действия стабилитрона.

2.6. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- цель работы;
- паспортные данные стабилитрона;
- схемы для снятия прямой и обратной ветвей ВАХ;
- таблицы с результатами измерений;
- вольтамперная характеристика стабилитрона;
- определение параметров стабилитрона;
- выводы.

2.7. Контрольные вопросы

2.7.1. Поясните механизм лавинного пробоя.

2.7.2. Перечислите основные параметры стабилитрона и поясните их смысл.

2.7.3. Какой вид имеет вольтамперная характеристика стабилитрона?

2.7.4. Как определить параметры стабилитрона по его вольтамперной характеристике?

Лабораторная работа 3

ИССЛЕДОВАНИЕ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

3.1. Цель работы: ознакомление с принципом действия биполярного транзистора, исследование его характеристик, определение параметров по экспериментальным данным.

3.2. Теоретические сведения

3.2.1. Структура и принцип действия биполярного транзистора

Биполярный транзистор представляет собой полупроводниковый прибор, содержащий три области с чередующимся типом проводимости и имеющий три вывода. Области применения биполярных транзисторов — это усиление электрических сигналов, работа в импульсных и цифровых схемах для обработки информации и пр. В зависимости от того, в каком порядке чередуются области, различают две структуры биполярных транзисторов: $n-p-n$ и $p-n-p$. Принцип их действия одинаков, разница заключается лишь в полярностях подаваемых напряжений. На рис. 3.1 изображена структура транзистора типа $n-p-n$ и показано подключение внешних напряжений для усилительного режима работы транзистора.

Биполярный транзистор представляет собой трехслойную полупроводниковую структуру, содержащую три области: эмиттер (Э), базу (Б) и коллектор (К). Области эмиттера и коллектора для такого вида транзистора выполняются с электронной проводимостью, а базы — с дырочной проводимостью. От каждой области делается вывод для присоединения транзистора к внешним цепям. Области эмиттера и коллектора выполнены с большой концентрацией, а база — с малой концентрацией примесей. Кроме того, толщина области базы очень мала по сравнению с областями эмиттера и коллектора. На схеме, приведенной на рис. 3.1, вывод базы является общим для обоих подключенных источников, поэтому такая схема включения называется схемой с общей базой (ОБ). При указанной на схеме полярности напряжение между эмиттером и базой $U_{эб}$ подключено к переходу «эмиттер — база» в прямом направлении, а напряжение $U_{бк}$ приложено к переходу «база — коллектор» в обратном направлении.

При подаче прямого напряжения $U_{эб}$ начинается диффузионное движение основных носителей — электронов из эмиттера в базу.

Поскольку ширина базы очень мала, а концентрация дырок в базе незначительна, то лишь незначительная доля электронов рекомбинирует с дырками базы, а подавляющая часть электронов доходит до коллекторного перехода. Коллекторный переход включен в обратном направлении, поэтому в нем существует сильное электрическое поле, которое захватывает электроны, дошедшие до этого перехода, и перебрасывает их в область коллектора. Таким образом создается ток эмиттера $I_э$ и ток коллектора $I_к$. Из-за частичной рекомбинации дырок в области базы ее нейтральность нарушается; для ее восстановления в базу поступает необходимое количество дырок от источника $U_{эб}$, т. е. создается ток базы $I_б$.

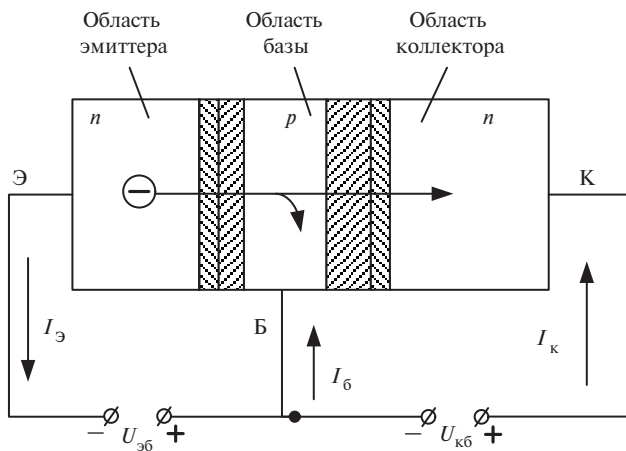


Рис. 3.1. Структура и схема включения n - p - n -транзистора

Из вышеизложенного следует соотношение между токами в транзисторе

$$I_э = I_к + I_б. \quad (3.1)$$

Отношение тока коллектора к току эмиттера называется коэффициентом передачи по току в схеме с общей базой $\alpha = \frac{I_к}{I_э}$.

Так как ток базы очень мал по сравнению с токами эмиттера и коллектора, то коэффициент передачи тока в схеме ОБ близок к единице и для реальных транзисторов составляет величину 0,9...0,99.

3.2.2. Усилительные свойства транзистора в схеме с общей базой

Цепь эмиттера в схеме ОБ является входной цепью, а цепь коллектора — выходной. Напряжение $U_{эб}$ можно считать входным напряжением, величина которого при прямом включении эмиттерного перехода соизмерима с контактной разностью потенциалов и составляет доли вольта. Сопротивление эмиттерного перехода $R_{эб}$ имеет малую величину — десятки и сотни Ом. В то же время коллекторный переход включен в обратном направлении и его сопротивление достаточно большое — десятки и сотни килоом. Поэтому к коллекторному переходу можно приложить большое по величине напряжение, в десятки раз превышающее напряжение в цепи эмиттера. Если при этом в цепь коллектора включить резистор нагрузки R_k с большим сопротивлением, составляющим обычно несколько килоом, то напряжение, падающее на этом резисторе, при одинаковых практически токах эмиттера и коллектора будет значительно превышать напряжение во входной эмиттерной цепи

$$I_k R_k \gg I_{эб} R_{эб}. \quad (3.2)$$

Таким образом, схема с общей базой обеспечивает усиление по напряжению, а также по мощности, но не дает усиления по току.

3.2.3. Схемы включения биполярного транзистора

На практике применяются три схемы включения транзистора. Название схемы определяется одним из трех выводов, являющимся общим для входной и выходной цепи. Различают три схемы включения: с общей базой (ОБ), с общим эмиттером (ОЭ) и с общим коллектором (ОК). Эти схемы показаны на рис. 3.2 а, б, в.

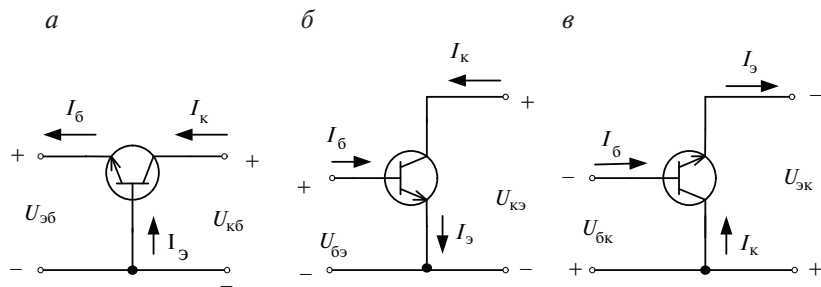


Рис. 3.2. Схемы включения биполярного транзистора

Структура транзистора и его подключение к источникам питания, изображенные на рис. 3.1, соответствуют схеме включения транзистора с общей базой (рис. 3.2 а). Схемы, изображенные на рис. 3.2, приведены для транзистора типа *n-p-n*. На практике широкое применение нашли биполярные транзисторы с другим чередованием областей, а именно – *p-n-p*. Принцип их действия такой же, разница состоит лишь в противоположной полярности приложенных напряжений.

Наибольшее распространение на практике получила схема включения с общим эмиттером (ОЭ). Коэффициент передачи (усиления) по току в схеме ОЭ обозначается β и с учетом соотношения токов в транзисторе равен

$$\beta = \frac{I_k}{I_{\text{э}}} = \frac{\alpha I_{\text{э}}}{I_{\text{э}} - I_k} = \frac{\alpha I_{\text{э}}}{I_{\text{э}} - I_{\text{э}}} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}. \quad (3.3)$$

Ток коллектора соответственно можно выразить через ток базы с помощью формулы

$$I_k = \beta I_{\text{б}}. \quad (3.4)$$

Из полученного соотношения видно, что схема включения с общим эмиттером позволяет получить значительный коэффициент усиления по току. Если учесть, что реальная величина α составляет 0,9...0,99, то коэффициент усиления β может составлять несколько десятков и даже сотен единиц. Наряду с усилением по току схема включения с общим эмиттером обеспечивает также усиления по напряжению и по мощности по тем же причинам, что и схема с общей базой. Далее рассматриваются характеристики и параметры биполярного транзистора применительно к схеме с общим эмиттером как наиболее распространенной на практике.

3.2.4. Статические характеристики биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером

Для анализа работы различных схем с применением биполярных транзисторов используются в первую очередь его статические характеристики. Основными являются входные и семейство выходных характеристик.

Входные характеристики (рис. 3.3) представляют собой зависимости тока базы от напряжения на базе при фиксированных напряжениях на коллекторе $I_{\text{б}} = f(U_{\text{бэ}})$ при $U_{\text{кэ}} = \text{const}$.

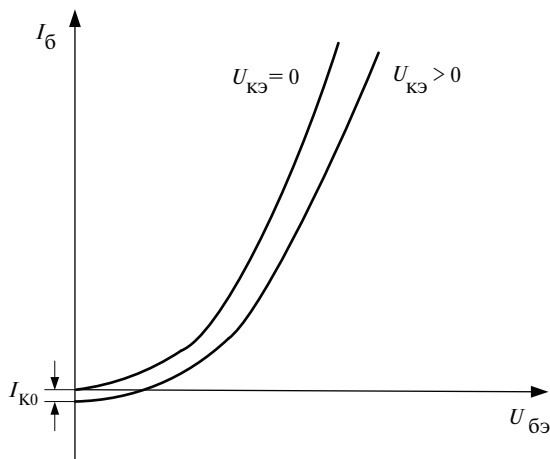


Рис. 3.3. Входные характеристики биполярного транзистора в схеме ОЭ

При $U_{кэ} = 0$ входная характеристика имеет вид прямой ветви p - n -перехода с той разницей, что по оси токов откладывается часть тока эмиттера, а именно — ток базы. При $U_{кэ} > 0$ (для n - p - n -транзисторов) входная характеристика смещается вниз. Это объясняется так называемым эффектом модуляции толщины базы (эффектом Эрли). При подаче на коллекторный переход обратного напряжения за счет возрастания напряженности электрического поля в запирающем слое его толщина увеличивается, причем запирающий слой расширяется в основном в сторону базы в связи с малой концентрацией примесей в базе по сравнению с коллектором. Толщина проводящего слоя базы уменьшается, что приводит к уменьшению количества зарядов, рекомбинировавших в базе, и, как следствие, — к уменьшению тока базы. При нулевом напряжении источника $U_{бэ}$ ток базы практически равен обратному току коллекторного перехода $I_{к0}$, который создается коллекторным источником питания и замыкается через низкое внутреннее сопротивление базового источника напряжения.

Графики зависимостей тока коллектора от напряжения на коллекторе при фиксированных токах базы $I_к = f(U_{кэ})$ при $I_б = \text{const}$ представляют собой семейство выходных характеристик биполярного транзистора (рис. 3.4).

Нижняя выходная характеристика соответствует нулевому току базы $I_б = 0$, коллекторный ток на пологом участке этой характеристики

равен обратному току коллекторного перехода $I_{к0}$, создаваемому коллекторным источником питания. Эта характеристика соответствует режиму отсечки, когда оба перехода закрыты и сопротивление транзистора между эмиттером и коллектором велико.

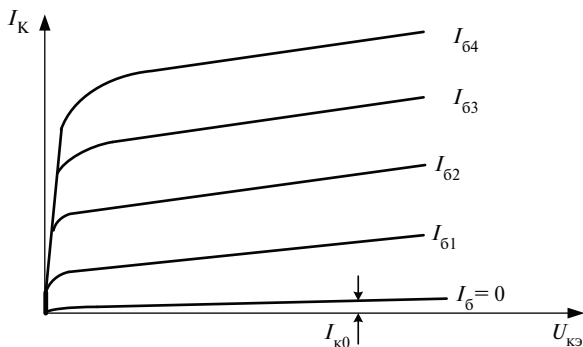


Рис. 3.4. Выходные характеристики биполярного транзистора в схеме ОЭ

Увеличение тока базы приводит к увеличению тока коллектора в соответствии с выражением (3.4) и к смещению выходных характеристик вверх. На пологом участке характеристики имеют некоторый наклон к оси абсцисс, это объясняется влиянием эффекта модуляции толщины базы. При увеличении коллекторного напряжения, как было показано ранее, происходит уменьшение тока базы. Но выходные характеристики должны сниматься при постоянных токах базы. Это постоянство обеспечивается путем увеличения напряжения в цепи базы и приводит соответственно к увеличению тока коллектора.

Крутой участок выходных характеристик вблизи оси ординат соответствует режиму насыщения. На этом участке напряжение $U_{бэ}$ по модулю больше, чем напряжение $U_{КЭ}$, причем оно приложено к обоим переходам в прямом направлении — к эмиттерному переходу непосредственно, а к коллекторному переходу через низкое внутреннее сопротивление источника коллекторного напряжения U_K . Оба перехода оказываются открытыми и имеют малое сопротивление, в результате сопротивление транзистора между коллектором и эмиттером также мало, что приводит к большим приращениям тока коллектора при малых приращениях напряжения на коллекторе. Когда

величина напряжения $U_{кз}$ превысит напряжение $U_{бэ}$, коллекторный переход становится включенным в обратном направлении, его сопротивление сильно возрастает и приращения тока коллектора при дальнейшем увеличении коллекторного напряжения будут малы. Область выходных характеристик между участками отсечки и насыщения называется активной областью, или усилительной областью, и используется для построения схем усилителей. Режимы насыщения и отсечки называются ключевыми режимами работы и применяются в импульсных и цифровых устройствах электроники.

3.2.5. Параметры биполярного транзистора

В усилительных каскадах транзистор должен работать на таких участках характеристик, где обеспечивается линейность преобразования сигнала. К этим участкам относится крутой, близкий к линейному, участок входной характеристики и активная область выходных характеристик. Для расчета усилительных схем используется система h -параметров транзистора. Транзистор представляется в виде четырехполюсника с действующими на входе и выходе токами и напряжениями. Уравнения, связывающие эти токи и напряжения с использованием h -параметров, для схемы с общим эмиттером имеют следующий вид:

$$\Delta U_{бэ} = h_{11} \Delta I_б + h_{12} \Delta U_{кз}; \quad (3.5)$$

$$\Delta I_к = h_{21} \Delta I_б + h_{22} \Delta U_{кз}.$$

Из этих уравнений можно получить формулы для определения h -параметров и выяснить их физический смысл:

- $h_{11э} = \frac{\Delta U_{бэ}}{\Delta I_б}$ при $U_{кз} = \text{const}$ – входное сопротивление транзистора;
- $h_{12э} = \frac{\Delta U_{бэ}}{\Delta U_{кз}}$ при $I_б = \text{const}$ – коэффициент внутренней обратной связи по напряжению;
- $h_{21э} = \frac{\Delta I_к}{\Delta I_б}$ при $U_{кз} = \text{const}$ – коэффициент усиления по току;
- $h_{22э} = \frac{\Delta I_к}{\Delta U_{кз}}$ при $I_б = \text{const}$ – выходная проводимость.

Кроме h -параметров используются и приводятся в справочниках также и другие параметры биполярных транзисторов, к которым относятся:

- $I_{к0}$ – обратный ток коллектора;
- $f_{гр}$ – граничная частота усиления, на которой коэффициент усиления уменьшается в $\sqrt{2}$ раз;
- $C_{к}$ – емкость коллекторного перехода, характеризующая свойства транзистора при работе на высоких частотах;
- $U_{к.маx}$ – предельно-допустимое напряжение на коллекторе, которое ограничивается напряжением пробоя коллекторного перехода;
- $I_{к.маx}$ – предельно-допустимый коллекторный ток.

3.3. Порядок выполнения работы

3.3.1. Ознакомьтесь с паспортными данными транзистора.

3.3.2. Соберите схему для снятия статических характеристик транзистора (рис. 3.5). Тип транзистора указывается преподавателем.

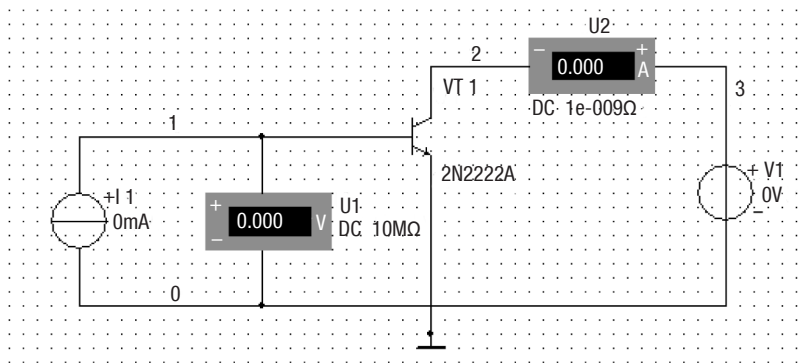


Рис. 3.5. Схема для снятия статических характеристик транзистора

3.3.3. Снимите входную характеристику транзистора при нулевом напряжении коллекторного источника питания V_1 . Задавая различные токи базы с помощью источника тока I_1 в соответствии с табл. 3.1, фиксируйте соответствующие напряжения на базе транзистора с помощью вольтметра U_1 . Результаты занесите в табл. 3.1. Снимите входную характеристику при напряжении на коллекторе 10 В, результаты также занесите в табл. 3.1.

Таблица 3.1

$U_{кэ}, \text{В}$	$I_{б}, \text{мА}$	0	0,01	0,02	0,04	0,06	0,1	0,2	0,3
0	$U_{бэ}, \text{В}$								
10	$U_{бэ}, \text{В}$								

3.3.4. Снимите семейство выходных характеристик транзистора $I_{к} = f(U_{кэ})$. Результаты занесите в табл. 3.2.

Таблица 3.2

$U_{кэ}, \text{В}$	0	0,05	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10
$I_{б}, \text{мА}$	$I_{к}, \text{мА}$								
0									
0,02									
0,04									
0,06									
0,08									
0,1									
0,12									

3.4. Обработка результатов измерений

3.4.1. Постройте входные и выходные характеристики транзистора.

3.4.2. Определите h -параметры транзистора. Значения токов и напряжений для расчетов определяются так, как это показано на рис. 3.6 и 3.7.

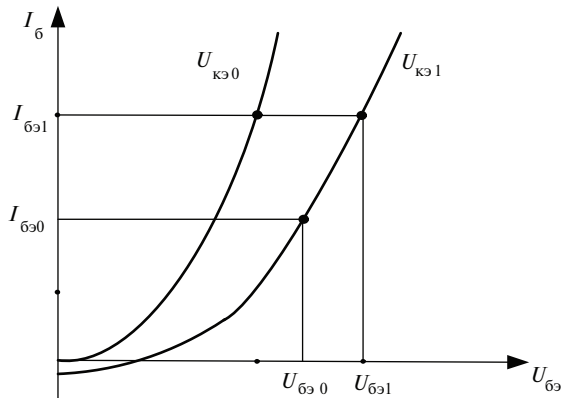


Рис. 3.6. Использование входных характеристик для определения h -параметров

Параметры h_{11} и h_{12} определяются с использованием входных характеристик транзистора по формулам

$$h_{11} = \frac{\Delta U_{\text{бэ}}}{\Delta I_{\text{бэ}}} = \frac{U_{\text{бэ}1} - U_{\text{бэ}0}}{I_{\text{б}1} - I_{\text{б}0}}, \quad (3.7)$$

$$h_{12} = \frac{\Delta U_{\text{бэ}}}{\Delta U_{\text{кэ}}} = \frac{U_{\text{бэ}1} - U_{\text{бэ}0}}{U_{\text{кэ}1} - U_{\text{кэ}0}}. \quad (3.8)$$

Параметры h_{21} и h_{22} определяются с использованием выходных характеристик транзистора по формулам

$$h_{21} = \frac{\Delta I_{\text{к}}}{\Delta I_{\text{б}}} = \frac{I_{\text{к}2} - I_{\text{к}1}}{I_{\text{б}2} - I_{\text{б}1}}, \quad (3.9)$$

$$h_{22} = \frac{\Delta I_{\text{к}}}{\Delta U_{\text{кэ}}} = \frac{I_{\text{к}4} - I_{\text{к}3}}{U_{\text{кэ}2} - U_{\text{кэ}1}}. \quad (3.10)$$

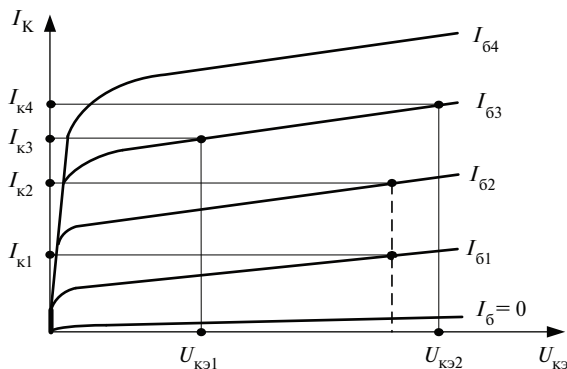


Рис. 3.7. Использование выходных характеристик для определения h -параметров

3.5. Содержание выводов

3.5.1. Сравните параметры, полученные из опытов, с паспортными значениями и сделайте вывод о их соответствии или несоответствии.

3.5.2. Объясните вид входных и выходных характеристик с учетом принципа действия биполярного транзистора.

3.6. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- цель работы;
- паспортные данные транзистора;
- схему для снятия статических характеристик;
- таблицы с результатами опытов;
- входные и выходные статические характеристики;
- расчеты h -параметров;
- выводы.

3.7. Контрольные вопросы

3.7.1. Приведите основные соотношения для токов в биполярном транзисторе.

3.7.2. Объясните принцип действия биполярного транзистора.

3.7.3. Поясните, какими усилительными свойствами обладает биполярный транзистор в схемах с общей базой и общим эмиттером.

3.7.4. Приведите схемы включения биполярных транзисторов с общей базой и общим эмиттером, имеющих структуры $n-p-n$, и $p-n-p$, и объясните их различия.

3.7.5. Изобразите входные характеристики биполярного транзистора и объясните их вид.

3.7.6. Изобразите выходные характеристики биполярного транзистора и объясните их вид.

3.7.7. Поясните, как определить h -параметры с использованием входной характеристики транзистора.

3.7.8. Поясните, как определить h -параметры с использованием выходных характеристик транзистора.

3.7.9. Объясните, за счет чего обеспечиваются усилительные свойства транзистора.

3.7.9. Перечислите режимы работы биполярного транзистора и объясните их суть.

3.7.10. Изобразите схемы включения биполярного транзистора ОБ, ОЭ, ОК.

3.7.11. Какое соотношение связывает токи эмиттера и коллектора в схеме ОБ?

Лабораторная работа 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА

4.1. Цель работы: ознакомление с физическими основами работы полевого транзистора, исследование характеристик полевого транзистора с индуцированным каналом и изолированным затвором, определение его параметров.

4.2. Теоретические сведения

4.2.1. Структура и принцип действия полевых транзисторов с изолированным затвором

К полевым транзисторам относятся полупроводниковые приборы, в которых управление потоком основных носителей заряда осуществляется электрическим полем. В настоящее время основное применение нашли полевые транзисторы с изолированным затвором, имеющие структуру «металл-диэлектрик-полупроводник» (МДП-транзисторы). В качестве диэлектрика применяется чаще всего двуокись кремния, поэтому часто такую структуру называют «металл-окисел-полупроводник» (МОП-транзисторы). Транзисторы с такой структурой имеют две разновидности: с индуцированным каналом и со встроенным каналом. Рассмотрим структуру и принцип действия транзистора с изолированным затвором с индуцированным n -каналом. Схематично такая структура при отсутствии приложенных внешних напряжений показана на рис. 4.1.

Транзистор выполнен на кремниевой подложке p -типа. У поверхности подложки сформированы две сильно легированных примесями области истока и стока n^+ . На поверхности подложки создан тонкий слой диэлектрика, в качестве которого обычно применяют двуокись кремния. Сверху на слой диэлектрика нанесен тонкий металлический слой затвора с выводом. Сквозь слой диэлектрика сделаны металлические выводы истока и стока. С противоположной стороны подложки выполнен металлический слой с выводом подложки. При отсутствии напряжения на затворе проводящий слой между стоком и истоком отсутствует, и если приложить внешнее напряжение между стоком и истоком, то между этими областями будет протекать только незначительный обратный ток через включенный в обратном направлении переход между подложкой и одной из областей — стока

или истока. Для создания проводящего канала между этими областями используется вывод затвора. Если для показанной на рис. 4.1 структуры приложить к затвору положительный потенциал, то при определенном пороговом напряжении $U_{\text{пор}}$ под действием электрического поля компенсируется поле запирающего слоя перехода между областью истока и подложкой и в поверхностный слой подложки между стоком и истоком стягиваются электроны из области истока и частично из подложки, в которой они существуют как неосновные носители. Таким образом, между стоком и истоком формируется канал с электронной проводимостью, т. е. n -канал. При подаче положительного напряжения на сток по отношению к истоку через канал будет протекать ток, который называется током стока. На рис. 4.2 показана структура транзистора при подключении к внешним источникам напряжения при использовании схемы включения с общим истоком (ОИ), а на рис. 4.3 — соответствующая принципиальная электрическая схема. Изображения всех зарядов приняты такие же, как для p - n -перехода (рис. 1.2).

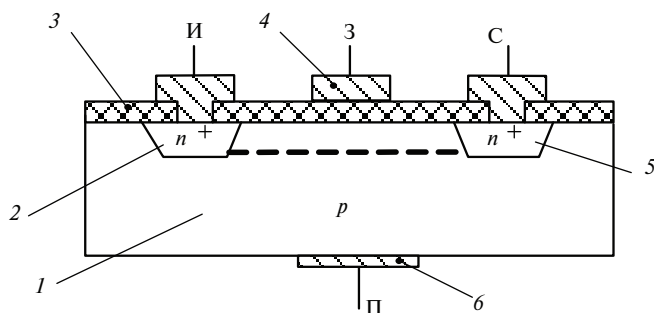


Рис. 4.1. Структура полевого транзистора с изолированным затвором с индуцированным n -каналом

1 — подложка; 2 — область истока; 3 — слой диэлектрика; 4 — затвор;
5 — область стока; 6 — подложка; И — вывод истока; С — вывод стока;
3 — вывод затвора; П — вывод подложки

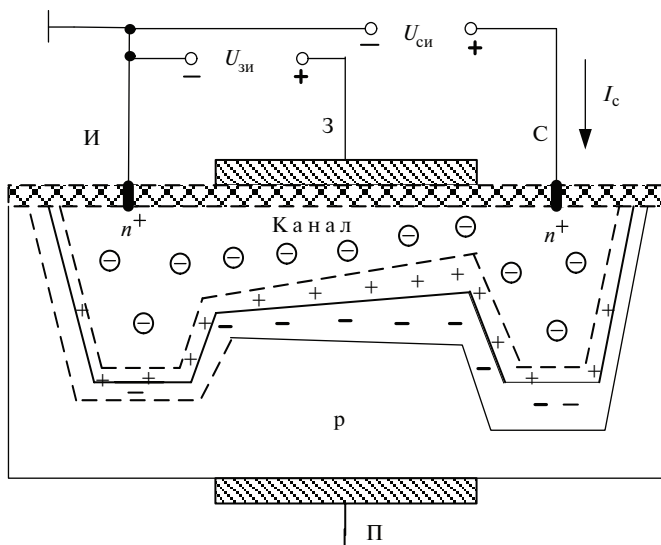


Рис. 4.2. Структура полевого транзистора с изолированным затвором и индуцированным каналом при подключении внешних напряжений

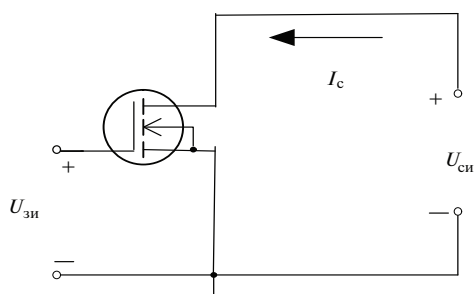


Рис. 4.3. Электрическая принципиальная схема включения полевого транзистора с общим истоком (ОИ)

Следует заметить, что напряжение сток-исток $U_{си}$ подключается в обратном направлении по отношению к $p-n$ -переходу между каналом и подложкой, причем электрический потенциал вдоль канала изменяется от напряжения $U_{си}$ на стоке до нуля на истоке. Следствием этого является уменьшение сечения канала по направлению от истока к стоку за счет расширения запирающего слоя.

4.2.2. Статические характеристики полевого транзистора с изолированным затвором и индуцированным каналом

К статическим характеристикам относятся стоко-затворные и стоковые (выходные) характеристики. Стоко-затворные характеристики представляют собой зависимости тока стока от напряжения затвористок при постоянных напряжениях на стоке. Вид стоко-затворных характеристик для транзистора с n -каналом для двух напряжений на стоке показан на рис. 4.4, причем напряжение $U_{си2}$ больше, чем $U_{си1}$. При увеличении напряжения на затворе ток стока растет за счет увеличения концентрации электронов в канале.

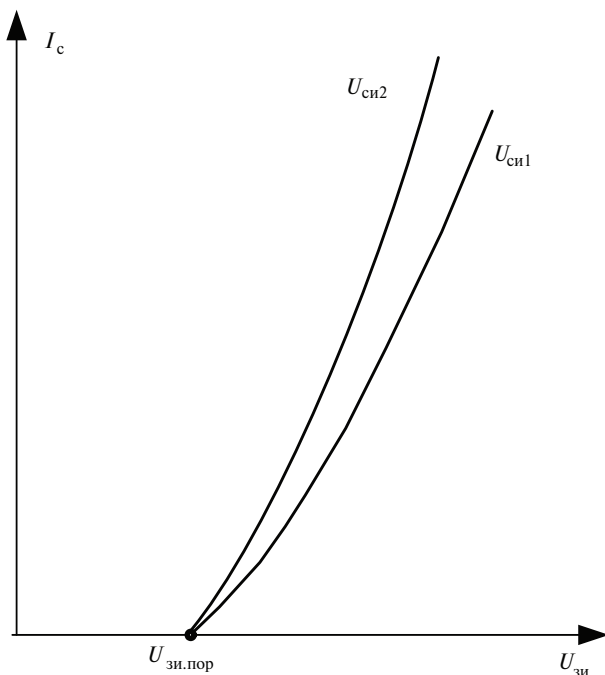


Рис. 4.4. Стоко-затворные характеристики полевого транзистора с изолированным затвором с индуцированным n -каналом

Стоковые характеристики представляют собой зависимости тока стока I_c от напряжения сток-исток $U_{си}$ при постоянных напряжениях на затворе. Вид стоковых характеристик для транзистора с n -каналом показан на рис. 4.5.

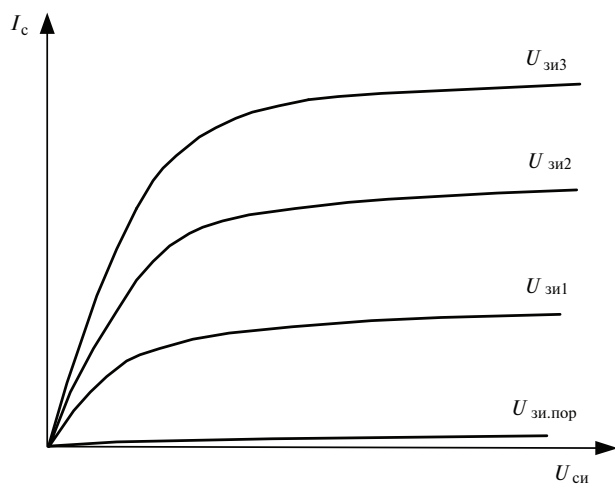


Рис. 4.5. Стоковые (выходные) характеристики полевого транзистора с индуцированным каналом с изолированным затвором

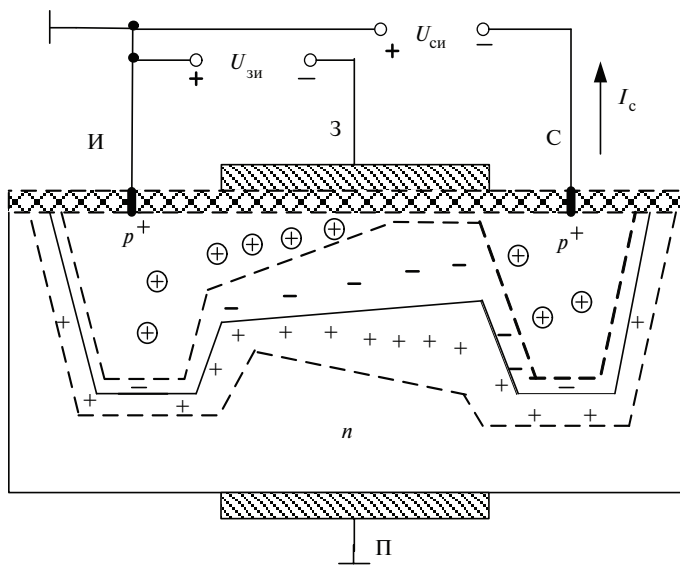


Рис. 4.6. Изменение формы канала при увеличении напряжения на стоке

При пороговом напряжении на затворе ток через канал мал по величине и определяется движением неосновных носителей заряда. При увеличении напряжения на затворе ток стока растет и характеристики смещаются вверх. Стоковые характеристики имеют существенно нелинейный характер. На начальном крутом участке сечение канала достаточно большое и его сопротивление мало, но с увеличением напряжения на стоке $U_{си}$ по модулю сечение канала уменьшается в сторону стока, как показано на рис. 4.6. Его сопротивление растет, и крутизна характеристик падает. Переход стоковых характеристик на более пологий участок связан с тем, что при увеличении напряжения на стоке канал стягивается в тонкую горловину и его сопротивление резко возрастает. Транзисторы с p -каналом имеют такой же принцип действия и аналогичные статические характеристики. Разница заключается в противоположных знаках всех зарядов и в противоположной полярности приложенных внешних напряжений.

Другой вид полевых транзисторов с изолированным затвором — это транзисторы с встроенным каналом. В таких транзисторах канал формируется в процессе изготовления транзистора в виде слоя вблизи поверхности подложки со средней концентрацией примеси. При нулевом напряжении на затворе и при подаче напряжения рабочей полярности на сток проводимость канала и ток стока имеют некоторые средние значения. Управление проводимостью канала осуществляется подачей на затвор напряжения того или другого знака. Например, для транзистора с p -каналом при подаче положительного напряжения на затвор основные носители — дырки выталкиваются из канала под действием электрического поля и проводимость канала падает. При некотором пороговом напряжении $U_{зи.пор}$ проводимость канала и ток стока уменьшаются практически до нуля. И наоборот, при подаче

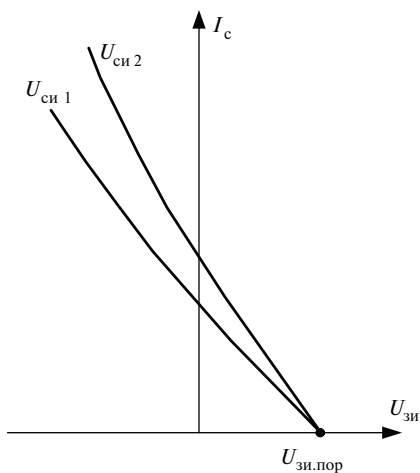


Рис. 4.7. Стоко-затворные характеристики полевого транзистора с изолированным затвором с встроенным p -каналом

отрицательного напряжения дырки стягиваются в канал и его проводимость и соответственно ток стока увеличиваются. Статические характеристики такого транзистора показаны на рис. 4.7 и 4.8.

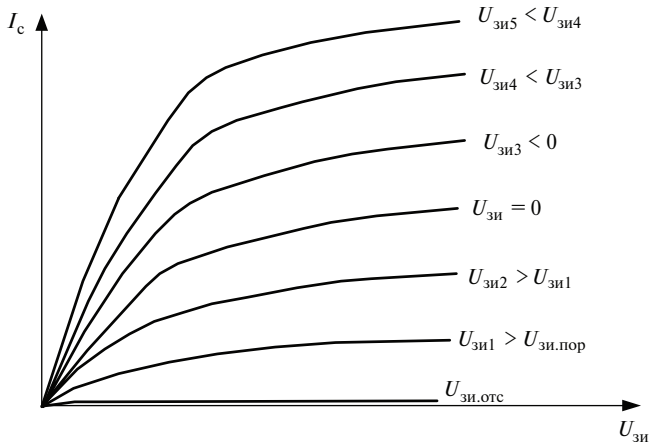


Рис. 4.8. Стоковые (выходные) характеристики полевого транзистора с изолированным затвором с встроенным p -каналом

Транзисторы с встроенным n -каналом имеют подобный принцип действия, но в отличие от p -канала, все напряжения имеют противоположный знак, стоко-затворная характеристика начинается в левом квадранте, а неравенства на стоковых характеристиках противоположны.

4.2.3. Параметры МОП-транзисторов

К основным параметрам МОП-транзисторов относятся:

- $S = \frac{dI_c}{dU_{зи}}$ — крутизна стоко-затворной характеристики;
- $U_{пор}$ — пороговое напряжение;
- $f_{гр}$ — граничная частота;
- $C_{зи}$ — емкость между затвором и истоком;
- R_k — сопротивление канала;
- $I_{c, \max}$ — предельно-допустимый постоянный ток стока;
- $U_{си, \max}$ — предельно-допустимое постоянное напряжение между стоком и истоком.

Для оценки свойств транзистора используются также такие параметры, как его внутреннее сопротивление R_i , определяемое на пологом участке стоковых характеристик, и коэффициент усиления μ , который находится по формуле

$$\mu = SR_i$$

4.3. Порядок выполнения работы

4.3.1. Ознакомьтесь с паспортными данными полевого транзистора. Тип транзистора задается преподавателем.

4.3.2. Соберите схему для снятия статических характеристик транзистора с n -каналом (рис. 4.9).

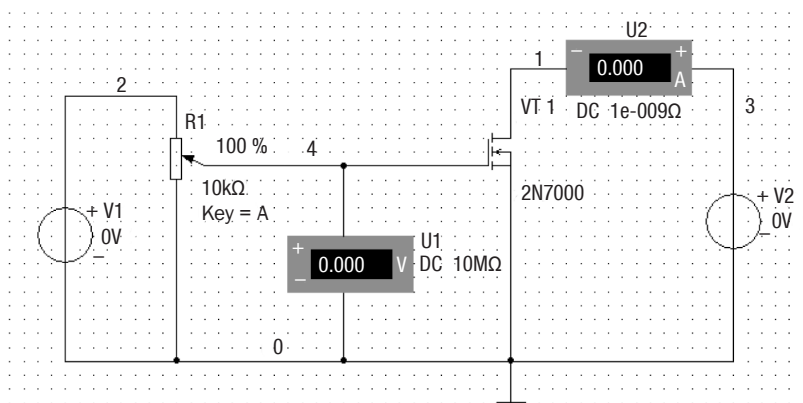


Рис. 4.9. Схема для снятия статических характеристик МОП-транзистора с n -каналом

4.3.3. Установите напряжение источника V_2 в стоковой цепи транзистора равным 5 В и снимите стоко-затворную характеристику $I_c = f(U_{зи})$ при напряжении на стоке $U_{си} = 5$ В. Активизируйте схему клавишей «Пуск». Прежде всего следует определить пороговое напряжение $U_{си.пор}$, при котором открывается транзистор (т. е. индуцируется канал). Для этого следует плавно перемещать левой клавишей мыши (ЛКМ) движок виртуального потенциометра, расположенный под символом «Key=A», и наблюдать за величиной тока стока по амперметру U_2 . Пороговому напряжению будет соответствовать момент, когда начнется резкое возрастание тока стока, ориентировочно от величины в несколько десятков микроампер до 0,5...1 мА.

Отсчитайте величину порогового напряжения по вольтметру U_1 и занесите ее в табл. 4.1. Далее следует устанавливать значения напряжения на затворе в соответствии с табл. 4.1 и определять величины тока стока. 4.3.4. Установите напряжение на стоке 10 В и снимите сток-затворную характеристику при $U_{\text{си}} = 10$ В. Результаты опытов занесите в табл.4.1.

Таблица 4.1

$U_{\text{си}}, \text{ В}$	$U_{\text{зи}}, \text{ В}$	$U_{\text{зи.пор}} = \dots$	3	4	5	6
5 В	$I_{\text{с}}, \text{ мА}$	$I_{\text{с}} = \dots$				
10 В		$I_{\text{с}} = \dots$				

4.3.4. Снимите стоковые характеристики транзистора при фиксированных напряжениях на затворе. Для этого устанавливайте напряжения на затворе в соответствии с табл. 4.2. Для каждого значения напряжения на затворе определите значения тока стока $I_{\text{с}}$ при изменении напряжения $U_{\text{си}}$. Результаты занесите в табл. 4.2.

Таблица 4.2

$U_{\text{зи}}, \text{ В}$	$U_{\text{си}}, \text{ В}$	0,5	1	2	4	6	8	10
$U_{\text{зи.пор}} = \dots$	$I_{\text{с}}, \text{ мА}$							
3								
4								
5								
6								

4.4. Обработка результатов измерений

4.4.1. Постройте графики сток-затворных и стоковых характеристик.

4.4.2. По характеристикам определите параметры транзистора:

- крутизну сток-затворной характеристики S ;
- внутреннее сопротивление транзистора R_i ;
- коэффициент усиления μ ;
- пороговое напряжение $U_{\text{си.пор}}$.

4.5. Содержание выводов

4.5.1. Сравните параметры транзистора, определенные по опыт-ным данным, с паспортными данными и оцените их соответствие.

4.5.2. Объясните вид характеристик с учетом принципа действия транзистора.

4.6. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- цель работы;
- паспортные данные транзистора;
- схема для снятия статических характеристик;
- таблицы с результатами опытов;
- стоко-затворные и стоковые характеристики транзистора;
- расчеты параметров транзистора;
- выводы.

4.7. Контрольные вопросы

4.7.1. Поясните устройство и принцип действия полевых транзисторов с изолированным затвором с индуцированным и с встроенным каналом.

4.7.2. Изобразите стоко-затворные и стоковые характеристики полевых транзисторов с изолированным затвором с индуцированным каналом и с встроенным каналом и объясните их вид.

4.7.3. Перечислите параметры МОП-транзисторов и объясните их смысл.

Лабораторная работа 5

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ КЛЮЧЕЙ

5.1. Цель работы: исследование статических состояний и быстродействия транзисторного ключа, изучение влияния параметров схемы ключа и нагрузки на его работу.

5.2. Теоретические сведения

5.2.1. Электронный ключ на биполярном транзисторе

Статические режимы работы ключа

Электронный ключ выполняет функции коммутационного элемента, предназначенного для замыкания и размыкания электрической цепи. В этом смысле его работа подобна работе электромеханического выключателя, разница заключается в том, что электронный ключ является бесконтактным устройством, а функции коммутации выполняет биполярный или полевой транзистор, находящийся в открытом или закрытом состоянии. Электронный ключ, таким образом, может находиться в двух устойчивых состояниях — замкнутом и разомкнутом. В открытом состоянии транзистор имеет минимальное сопротивление, а в закрытом — максимальное. Переключение транзистора из одного состояния в другое осуществляется подачей на вход устройства управляющего напряжения.

Различают два варианта схемы ключа — нормально разомкнутый ключ, имеющий большое сопротивление при отсутствии управляющего сигнала, и нормально замкнутый ключ, имеющий малое сопротивление при отсутствии управляющего сигнала. Схема нормально разомкнутого ключа на биполярном транзисторе показана на рис. 5.1.

При отсутствии на входе управляющего импульса транзистор VT закрыт, так как напряжение на базе равно нулю, а пороговое напряжение, при котором открывается кремниевый $n-p-n$ -транзистор, составляет 0,6...0,8 В. Через переход коллектор-база протекает обратный ток $I_{к0}$, который для кремниевых транзисторов очень мал и составляет доли микроампера. Внутреннее сопротивление закрытого транзистора при этом очень велико, и можно считать цепь между коллектором и эмиттером разомкнутой. На выходных характери-

ках транзистора (рис. 5.2) рабочая точка занимает положение «1» на нижней характеристике, что соответствует режиму отсечки транзистора. Напряжение на коллекторе закрытого транзистора $U_{к.закр}$ близко к ЭДС источника коллекторного питания $U_{к.закр} \approx E_k$. Таким образом, при отсутствии входного управляющего сигнала транзистор выполняет функцию разомкнутого ключа.

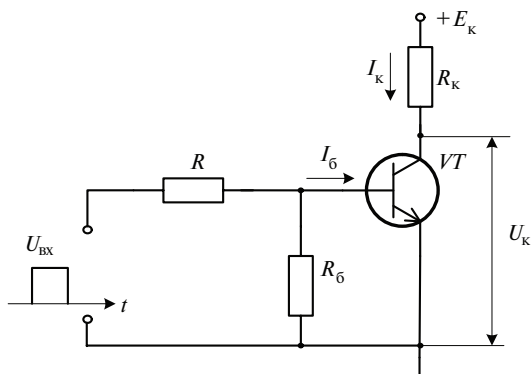


Рис. 5.1. Схема нормального разомкнутого ключа на биполярном транзисторе

Для перевода ключа в состояние «включено» на вход подается положительный управляющий импульс прямоугольной формы с амплитудой $U_{вх.м}$, переключающий транзистор в режим насыщения. Рабочая точка при этом перемещается по нагрузочной прямой в положение «2» (рис. 5.2). В коллекторной цепи будет протекать ток коллектора насыщения $I_{кн}$.

Ток базы $I_{бн}$, при котором обеспечивается насыщение транзистора, связан с коллекторным током насыщения соотношением $I_{бн} = \frac{I_{кн}}{\beta}$, где β — коэффициент усиления по току в схеме с общим эмиттером. В режиме насыщения оба перехода под действием импульса управления смещены в прямом направлении, сопротивление транзистора резко падает, ток коллектора достигает максимально возможного значения, а напряжение на транзисторе $U_{кн}$ минимально и составляет доли вольта (0,2...0,4 В). В этом состоянии транзистор выполняет функцию замкнутого ключа. Для создания необходимого тока базы, следует выбрать амплитуду входного импульса и сопротивление

в цепи базы в соответствии с формулой $I_{\text{бн}} = \frac{U_{\text{вх.м}}}{R}$. Реальные транзисторы всегда имеют достаточно большие разбросы коэффициента усиления по току, поэтому для гарантированного обеспечения режима насыщения надо ориентироваться на минимальный коэффициент $\beta_{\text{мин}}$, который можно найти в справочных данных для конкретного типа транзистора. Предполагая, что коллекторный ток насыщения близок к величине $\frac{E_{\text{к}}}{R_{\text{к}}}$, можно получить расчетную формулу

$$\frac{U_{\text{вх.м}}}{R} = \frac{E_{\text{к}}}{R_{\text{к}} \beta_{\text{мин}}} . \quad (5.1)$$

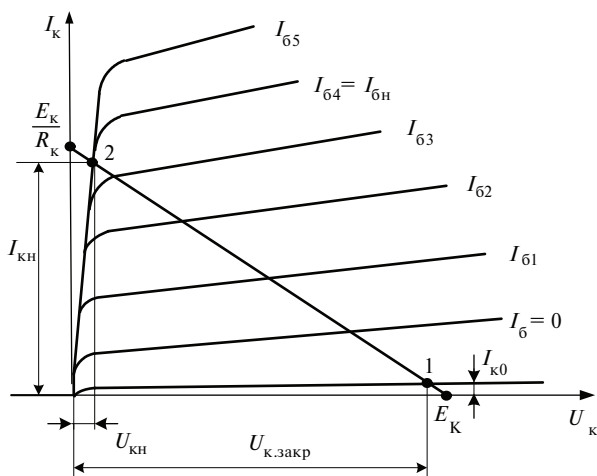


Рис. 5.2. Отображение ключевых режимов на выходных характеристиках

Если примененный в схеме ключа конкретный экземпляр транзистора будет иметь коэффициент передачи тока $\beta > \beta_{\text{мин}}$, а параметры схемы рассчитаны по формуле (5.1), то транзистор войдет в глубокое насыщение, степень насыщения оценивается коэффициентом

$$S = \frac{I_{\text{к}}}{I_{\text{кн}}} = \frac{\beta I_{\text{бн}}}{\beta_{\text{мин}} I_{\text{бн}}} = \frac{\beta}{\beta_{\text{мин}}} . \quad (5.2)$$

Диаграмма изменения входного и выходного напряжения с допущением, что ключ безынерционный, показана на рис. 5.3

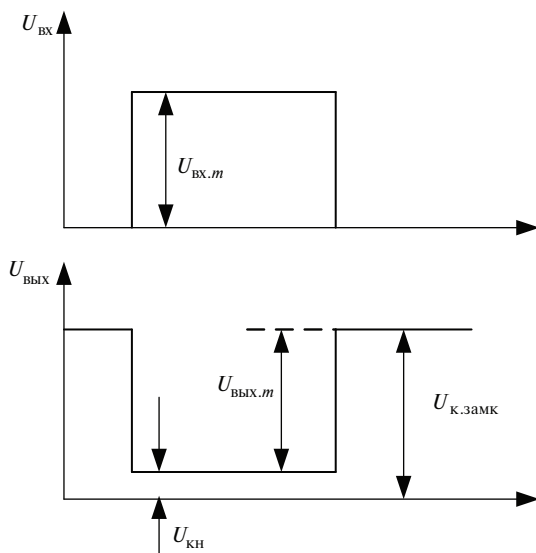


Рис. 5.3. Диаграмма работы нормально разомкнутого ключа

Схема другого варианта ключа — нормально замкнутого — показана на рис. 5.4.

При отсутствии входного управляющего импульса транзистор открыт до насыщения, так как на переход база-эмиттер подано прямое смещение от источника E_k через резистор R_0 . Чтобы транзистор был насыщен с учетом разбросов коэффициента передачи тока, необходимо выполнение условия $I_0 \geq I_{0н}$. Для этого параметры схемы должны подчиняться соотношению

$$\frac{E_k}{R_0} \geq \frac{E_k}{R_k \beta_{\min}} \quad \text{или} \quad R_0 \leq \beta_{\min} R_k. \quad (5.3)$$

При выполнении этого условия коэффициент насыщения будет равен или больше единицы, что обеспечивает замкнутое состояние ключа при отсутствии входного управляющего импульса. При подаче отрицательного управляющего импульса транзистор переключается в режим отсечки и выполняет роль разомкнутого ключа.

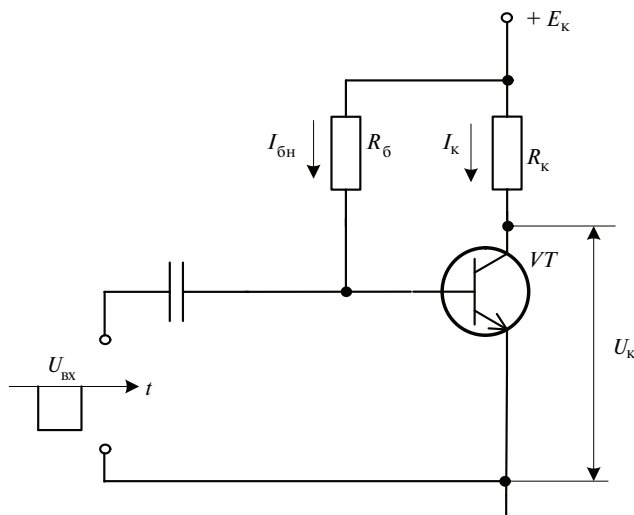


Рис. 5.4. Схема нормально замкнутого ключа на биполярном транзисторе

Переходные процессы при включении и выключении ключа

Физические процессы в транзисторе носят диффузионный характер и связаны с перемещением электрических зарядов. Кроме того, в транзисторе существует барьерная емкость коллекторного перехода, поэтому транзистор является инерционным прибором и переключение из одного состояния в другое занимает определенное время. Рассмотрим процессы, происходящие в нормально разомкнутом ключе (рис. 5.5) при его включении и выключении. Время перехода транзистора из состояния отсечки в состояние насыщения называется временем включения $t_{\text{вкл}}$, а из состояния насыщения в состояние отсечки — временем выключения $t_{\text{выкл}}$.

При подаче положительного управляющего напряжения на базу транзистора в базовой цепи потечет ток $I_{\text{б1}} = \frac{U_{\text{вх.м}}}{R}$. Ток коллектора в связи с инерционными свойствами транзистора будет изменяться не скачком, а по закону переходной характеристики транзистора

$$I_{\text{к}} = \beta I_{\text{б1}} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{\text{п}}}} \right), \quad (5.4)$$

где $\tau_\beta = \frac{1}{2\pi f_\beta}$ — постоянная времени транзистора.

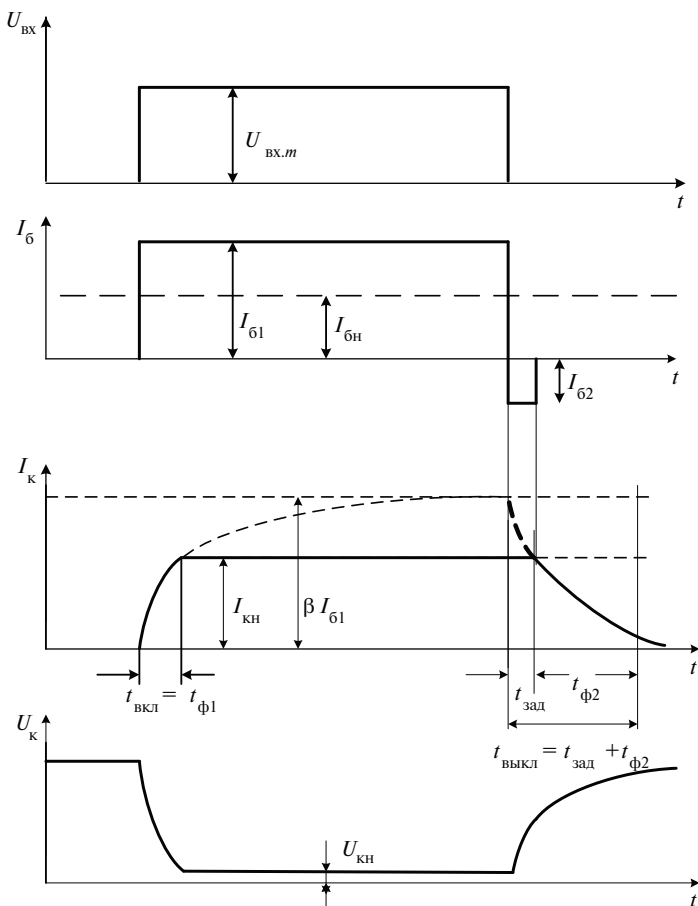


Рис. 5.5. Переходные процессы в транзисторном ключе

Такой характер изменения тока коллектора обусловлен процессами накопления свободных зарядов в базе транзистора.

В соответствии с выражением (5.4) ток коллектора нарастает по экспоненциальному закону, стремясь к величине $\beta I_{б1}$, однако при достижении значения коллекторного тока насыщения $I_{кн}$ реальный

коллекторный ток перестает увеличиваться (рис. 5.6), при этом в базе накапливается избыточный объемный заряд неосновных носителей.

Прологарифмировав уравнение (5.4), получим выражение для времени включения, другими словами, для времени переднего фронта выходного импульса

$$t_{\text{вкл}} = \tau_{\beta} \frac{1}{1 - \frac{I_{\text{кн}}}{\beta I_{61}}} . \quad (5.5)$$

После окончания входного управляющего импульса начинается процесс выключения транзисторного ключа. Время выключения складывается из двух составляющих — времени задержки и времени заднего фронта (среза). На первом этапе ток коллектора сохраняется на уровне тока насыщения, пока протекает процесс рассасывания неосновных носителей базы. Это время называется временем задержки $t_{\text{зад}}$, оно может быть определено как время, в течение которого кажущийся коллекторный ток уменьшится от величины βI_{61} до коллекторного тока насыщения. В интервале времени задержки ток базы меняет знак по отношению к первоначальному току базы за счет рассасывания неосновных носителей. Для получения формулы, определяющей время задержки, воспользуемся уравнением падающей экспоненты для коллекторного тока

$$i_{\text{к}}(t) = \beta(I_{61} + I_{62})e^{-\frac{t}{\tau_{\beta}}} - \beta I_{62} . \quad (5.6)$$

При $t = t_{\text{зад}}$ коллекторный ток равен $I_{\text{кн}}$. Сделав подстановки в выражение (5.6), получим после преобразований:

$$t_{\text{зад}} = \tau_{\beta} \ln \frac{1}{1 + \frac{I_{\text{кн}}(S-1)}{\beta(I_{61} + I_{62})}} . \quad (5.7)$$

Время заднего фронта можно определить на основании соотношения:

$$i_{\text{к}}(t) = I_{\text{кн}} e^{-\frac{t}{\tau_{\beta}}} . \quad (5.8)$$

Время заднего фронта приближенно можно определить как время, в течение которого коллекторный ток упадет относительно тока

насыщения в 8...10 раз. Тогда на основании уравнения (5.8) можно получить соотношение для времени заднего фронта $t_{\phi 2} = 4...5 \tau_p$.

Повышение быстродействия транзисторного ключа

Требования к быстродействию транзисторного ключа особенно актуальны при работе ключевых схем на высоких частотах, где плохое быстродействие ограничивает возможности логических и цифровых устройств. К простейшим способам повышения быстродействия относятся следующие.

Первый способ заключается в выборе высокочастотных транзисторов с высокой граничной частотой. Это следует из анализа формул (5.5), (5.7) и (5.8).

Второй способ заключается в применении ускоряющего конденсатора, включаемого в цепь базы для создания скачков базового тока при подаче и снятии входного управляющего импульса. Согласно формулам (5.5) и (5.7) увеличение базового тока приводит к уменьшению времени включения и времени задержки. Это можно объяснить тем, что при включении ускоряется накопление избыточных зарядов неосновных носителей в базе, а при выключении ускоряется рассасывание неосновных носителей базы.

Применяются также схемные решения, направленные на то, чтобы транзистор во включенном состоянии находился на границе режима насыщения. Это предотвращает накопление неосновных носителей заряда, и не требуются затраты времени на накопление и рассасывание избыточных зарядов. Для реализации способа параллельно коллекторному переходу включают диод Шоттки — анодом к базе, а катодом к коллектору. Пороговое значение напряжения, при котором открывается диод Шоттки, равно 0,3...0,4 В. В процессе открывания транзистора при подаче входного управляющего импульса происходит уменьшение потенциала коллектора и в момент, когда разность потенциалов базы и коллектора достигнет порогового напряжения 0,3...0,4 В, диод Шоттки откроется и зашунтирует коллекторный переход. Так как контактная разность потенциалов для кремниевого перехода составляет около 0,6...0,7 В, то коллекторный переход останется включенным в обратном направлении, но рабочая точка будет находиться вблизи уровня насыщения транзистора, т. е. внутреннее сопротивление транзистора и соответственно напряжение на коллекторе будет минимальным.

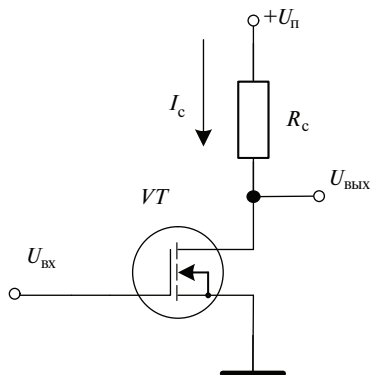


Рис. 5.6. Схема ключа на МОП-транзисторе

5.2.2. Электронный ключ на полевых транзисторах

Схема ключа на МОП-транзисторе с индуцированным n -каналом, предназначенная для коммутации электрической цепи, показана на рис. 5.6.

При нулевом входном напряжении транзистор закрыт и имеет очень большое внутреннее сопротивление, достигающее сотен и тысяч мегом, при этом электрическая цепь будет разомкнута, а выходное напряжение, снимаемое со стока, практически равно напряжению питания. При пре-

вышении входным напряжением порогового уровня транзистор открывается, его сопротивление резко уменьшается и может составлять величину 50...100 Ом. Цепь замыкается, напряжение на стоке будет существенно меньше, но его величина непосредственно зависит также от сопротивления нагрузки в цепи стока R_c . При небольшом сопротивлении нагрузки свойства ключа будут далеки от идеальных. Свойства, близкие к идеальным, можно получить в КМОП-ключе на основе комплементарной пары МОП-транзисторов, представляющей собой соединение двух МОП-транзисторов — одного с p -каналом, другого — с n -каналом (). Схема такого ключа показана на рис. 5.7.

Принцип действия такого ключа будем рассматривать для случая, когда к выходу не подключена нагрузка.

Если входное напряжение меньше порогового, то n -канальный транзистор $VT2$ будет находиться в закрытом состоянии, так как $U_{зи\ VT2} < U_{зи.пор}$, и его сопротивление будет большим. В то же время p -канальный транзистор $VT1$ будет открыт, так как напряжение на его затворе будет отрицательным по отношению к истоку, а по величине будет превышать пороговое. При подаче на вход положительного напряжения, превышающего пороговое, транзистор $VT2$ откроется, а разность напряжений между затвором и истоком $VT1$ окажется по величине меньше порогового, транзистор $VT1$ закроется. Свойства такой схемы ключа приближены к идеальным, так как сопротивление закрытого полевого транзистора многократно превышает сопротивление открытого транзистора, поэтому при отсутствии входного напряжения выход-

ное напряжение будет практически равно напряжению питания, а при подаче входного напряжения — близко к нулю. Следует отметить, что при подключении к выходу активной нагрузки свойства ключа могут отклоняться от идеальных.

Характер переходных процессов в ключах на полевых транзисторах обусловлен наличием емкостей между выводами транзистора, к которым относятся емкость между затвором и истоком $C_{зи}$, затвором и стоком $C_{зс}$ и проходная емкость $C_{си}$. Кроме того, на переходные процессы влияет также емкость, содержащаяся в нагрузке. При включении и выключении происходит перезаряд емкостей, что ограничивает быстродействие ключа.

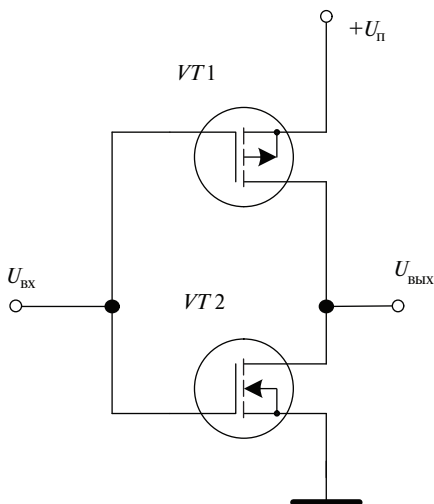


Рис. 5.7. Схема ключа на комплементарной паре МОП-транзисторов

5.3. Порядок выполнения работы

5.3.1. Соберите схему для исследования транзисторного ключа на биполярном транзисторе (рис. 5. 9). Тип транзистора выберите по указанию преподавателя.

5.3.2. Установите следующие настройки приборов:

- функциональный генератор: частота 200 кГц, амплитуда 2 В, смещение 2 В;
- осциллограф: масштаб по времени 5 В/дел, масштабы напряжений по каналам *A* и *B* — 5 В/дел,

5.3.3. Активизируйте схему с помощью клавиши «Пуск». Смещение по каналам *A* и *B* отрегулируйте так, чтобы осциллограмма входного сигнала располагалась выше осциллограммы выходного сигнала.

С помощью маркеров определите времена включения и выключения ключа, которые фиксируются в левом столбце данных измерений как разности « $T2 - T1$ » между моментом подачи управляющего импульса и моментом, соответствующим концу переходного процесса. Определите напряжения на выходе ключа в открытом

и закрытом состоянии транзистора (третий столбец данных измерений для канала *B*).

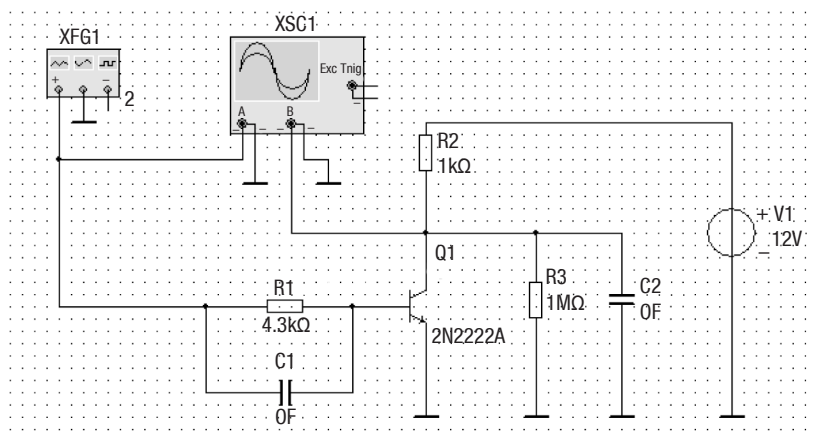


Рис. 5.8. Схема для исследования ключа на биполярном транзисторе

5.3.4. Зарисуйте осциллограммы входного импульса и выходного импульса в масштабе 1:1, запишите масштабы по времени и по напряжению.

5.3.5. Измените емкость ускоряющего конденсатора $C1$ в соответствии с указаниями преподавателя, оставив остальные параметры без изменения и повторите опыт аналогично п. 5.3.3 и 5.3.4.

5.3.6. Восстановите емкость $C1 = 0$ и измените емкость конденсатора нагрузки $C2$ в соответствии с указанием преподавателя. Повторите опыт аналогично п. 5.3.3 и 5.3.4.

5.3.7. Восстановите емкость $C2 = 0$ и измените сопротивление нагрузки $R3$ по указанию преподавателя. Повторите опыт аналогично п. 5.3.3 и 5.3.4.

5.3.8. Соберите схему для исследования КМОП-ключа (рис. 5.10).

5.3.9. Выберите тип транзистора по указанию преподавателя. Установите следующие настройки приборов:

- функциональный генератор: частота 200 кГц, амплитуда 10 В;
- осциллограф: масштаб по времени 0,5 мкс/дел, масштабы напряжений по каналам *A* и *B* — 10 В/дел.

5.3.10. Активизируйте схему с помощью клавиши «Пуск». Отрегулируйте расположение осциллограмм на экране осциллографа аналогично п.5.3.3.

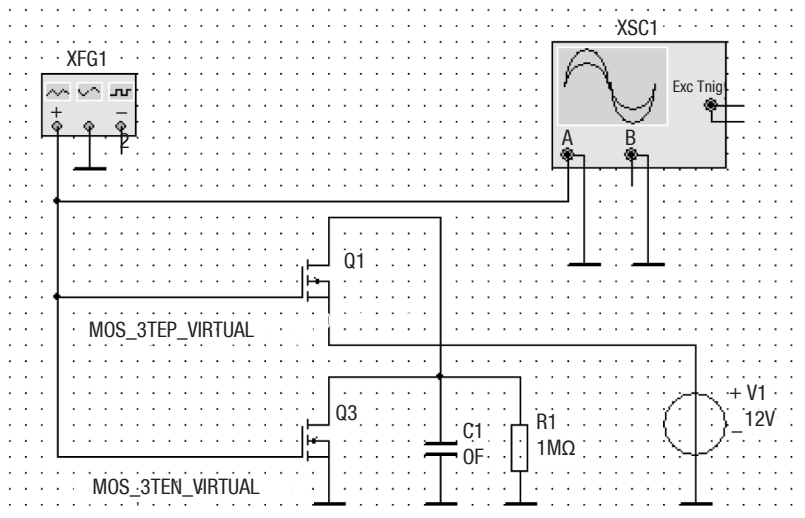


Рис. 5.9. Схема для исследования КМОП-ключа

5.3.11. Определите с помощью маркеров длительности фронтов и напряжения на выходе ключа для закрытого и открытого состояния транзистора $Q3$. Зарисуйте осциллограммы входного и выходного сигналов в масштабе 1:1.

5.3.12. Установите величину сопротивления $R1$ по указанию преподавателя и повторите опыт аналогично п. 5.3.11.

5.3.13. Восстановите величину сопротивления $R1$ до исходной величины 1 Мом и измените емкость конденсатора по указанию преподавателя. Повторите опыт аналогично п. 5.3.11.

5.4. Содержание выводов

Опишите особенности переходных процессов при включении и выключении ключа для исходного сочетания параметров. Объясните влияние емкости ускоряющего конденсатора и конденсатора нагрузки на длительности переднего и заднего фронтов выходного импульса. Объясните влияние сопротивления нагрузки на амплитуду выходного импульса. Подтвердите результаты опытов необходимыми расчетами.

5.5. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- цель работы;
- схемы для исследования транзисторных ключей;
- осциллограммы входного управляющего импульса и выходных импульсов для различных сочетаний параметров схемы; осциллограммы выходных импульсов должны располагаться под осциллограммой входного импульса в том же масштабе времени;
- выводы.

5.6. Контрольные вопросы

5.6.1. Поясните назначение транзисторного ключа.

5.6.2. Объясните, какие режимы работы транзистора используются в транзисторном ключе.

5.6.3. Изобразите выходные характеристики биполярного транзистора и нагрузочную прямую, покажите положение рабочей точки для ключевых режимов работы.

5.6.4. Поясните, в чем состоит разница между нормально замкнутым и нормально разомкнутым ключом.

5.6.5. Что такое степень насыщения транзистора?

5.6.6. Какие физические процессы обуславливают инерционные свойства транзисторного ключа?

5.6.7. За счет чего повышается быстродействие транзисторного ключа на биполярном транзисторе при использовании ускоряющего конденсатора?

5.6.8. Как влияет емкость нагрузки на быстродействие транзисторного ключа при его включении и выключении ?

5.6.9. Как влияет сопротивление нагрузки на амплитуду выходного импульса?

5.6.10. Изобразите схему ключа на комплементарных парах МОП-транзисторов.

5.6.11. Поясните принцип действия КМОП-ключа.

Лабораторная работа 6

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИГГЕРА ШМИТТА

6.1. Цель лабораторной работы: изучение принципа действия триггера Шмитта и экспериментальное исследование влияния элементов схемы на его работу.

6.2. Краткие теоретические сведения

Триггеры Шмитта представляют собой пороговые устройства с релейной характеристикой, вырабатывающие выходной прямоугольный импульс при достижении входным сигналом, имеющим произвольную форму, определенных уровней. При увеличении входного сигнала и достижении им порога срабатывания выходной сигнал скачкообразно увеличивается с низкого значения до высокого, а при уменьшении входного напряжения до порога отпускания происходит скачкообразное уменьшение выходного сигнала. Статическая характеристика триггера Шмитта показана на рис. 6.1.

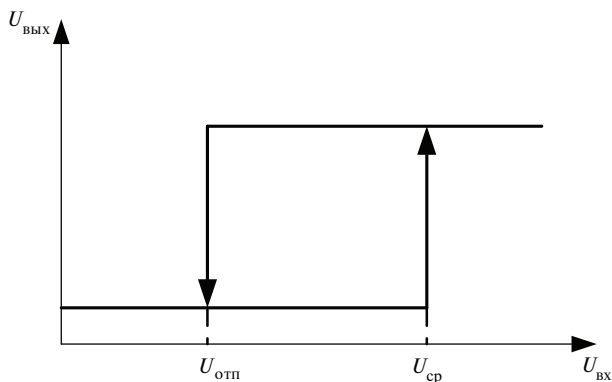


Рис. 6.1. Статическая характеристика триггера Шмитта

Триггеры Шмитта могут быть реализованы как на дискретных элементах, так и на интегральных микросхемах. Схема триггера Шмитта на биполярных транзисторах с эмиттерной связью приведена на рис. 6.2. Временная диаграмма работы триггера показана на рис. 6.3.

Транзисторы в схеме работают в ключевых режимах: насыщения и отсечки. Конденсатор C_y является ускоряющим и улучшает быстродействие при переключении триггера. В исходном состоянии при отсутствии входного напряжения транзистор $VT1$ находится в режиме отсечки, а транзистор $VT2$ – в режиме насыщения. Закрытое состояние транзистора $VT1$ обеспечивается за счет того, что разность напряжений на резисторах $R2$ и R_3 должна быть меньше порогового напряжения, составляющего для кремниевых транзисторов примерно 0,6 В. При этом должно быть выполнено соотношение:

$$I_{к2}R_3 + U_{пор} > \frac{E_k R2}{R1 + R2} \quad (6.1)$$

или

$$\frac{E_k R_3}{R_{к2} + R_3} + U_{пор} > \frac{E_k R2}{R1 + R2} \quad (6.2)$$

Таким образом, закрытое состояние транзистора $VT1$ обеспечивается за счет падения напряжения на эмиттерном сопротивлении, создаваемого током коллектора открытого транзистора $VT2$.

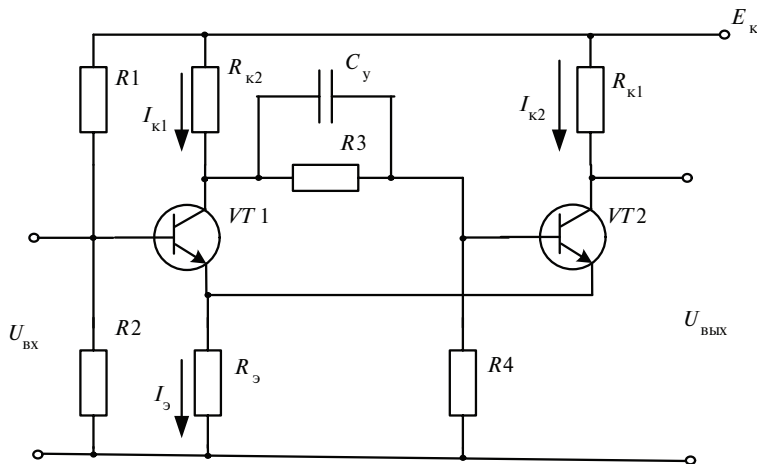


Рис. 6.2. Триггер Шмитта на биполярных транзисторах

Напряжение на коллекторе закрытого транзистора $VT1$ будет тогда практически равно ЭДС источника питания $U_{к1} = E_k$. Насыщенное

состояние транзистора $VT2$ должно быть обеспечено выбором сопротивлений делителя напряжения $R3-R4$ в цепи базы $VT2$, на который поступает высокий уровень напряжения с коллектора $VT1$.

Переключение триггера Шмитта в другое состояние происходит при нарастании входного напряжения от нуля до напряжения срабатывания, т. е. при выполнении условия $U_{вх} = U_{ср}$. Для схемы, приведенной на рис. 6.1, это условие можно представить

$$\frac{E_k R_3}{R_{k2} + R_3} + U_{пор} = \frac{E_k R_2}{R_1 + R_2} + U_{ср}. \quad (6.3)$$

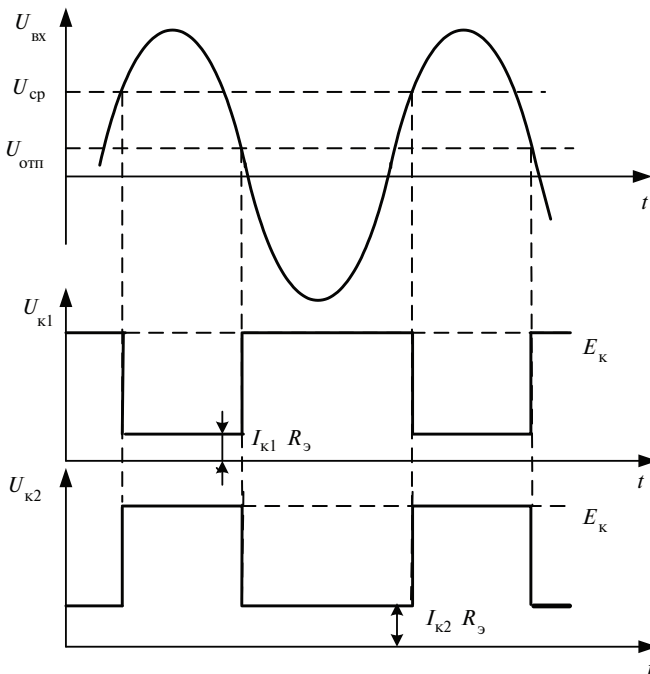


Рис. 6.3. Процессы в триггере Шмитта при его переключении

При достижении входным напряжением напряжения срабатывания транзистор $VT1$ начинает открываться, ток коллектора $I_{к1}$ возрастает, а напряжение на коллекторе $VT1$ убывает. Уменьшение этого

напряжения передается через делитель $R3-R4$ на базу транзистора $VT2$, и он начинает закрываться. При этом ток коллектора $I_{к2}$ уменьшается, что приводит к уменьшению запирающего напряжения, создаваемого этим током на сопротивлении R_3 . Далее процесс переключения приобретает лавинообразный характер, что связано с тем, что сопротивления в коллекторных цепях транзисторов выбираются из условия $R_{к1} > R_{к2}$. В связи с этим скорость убывания тока $I_{к2}$ значительно больше скорости нарастания тока $I_{к1}$, поэтому наблюдается эффект положительной обратной связи, приводящей к быстрому убыванию запирающего напряжения на сопротивлении R_3 . В то же время на сопротивлении R_3 за счет протекания тока $I_{к1}$ создается запирающее напряжение для транзистора $VT2$, способствующее более быстрому запирающему этого транзистора. В результате действия этих факторов транзистор $VT1$ открывается до насыщения, а транзистор $VT2$ закрывается до отсечки. Потенциал коллектора транзистора $VT2$ становится равным величине E_k . Обратное переключение также имеет лавинообразный характер и происходит при уменьшении входного напряжения до напряжения отпускания, которое можно определить по формуле

$$U_{\text{отп}} = \frac{E_k R_3}{R_3 + R_{к1}} + U_{\text{пор}}. \quad (6.4)$$

Следует отметить, что для нормальной работы схемы обязательно должно выполняться условие $R_{к1} > R_{к2}$, напряжение отпускания всегда меньше напряжения срабатывания.

Триггер Шмитта может быть реализован на основе использования интегральных микросхем. Схема триггера Шмитта с использованием логических инверторов показана на рис. 6.4.

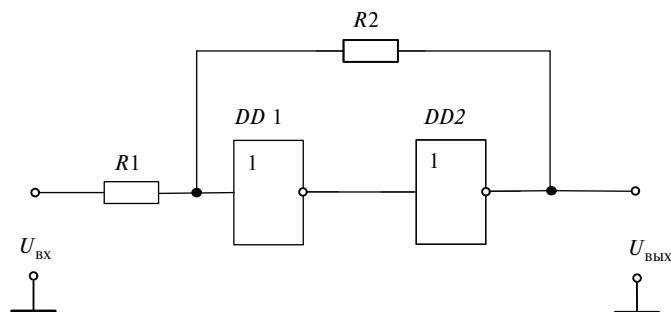


Рис. 6.4. Схема триггера Шмитта на интегральных микросхемах

Удобнее применять в качестве логических элементов ИМС серий КМОП, тогда в расчетах можно не учитывать входные сопротивления элементов, так как для микросхем этих серий они достаточно высокие.

В исходном состоянии входное и выходное напряжения равны нулю. При увеличении входного напряжения до уровня срабатывания, при котором напряжение на входе элемента $DD1$ достигнет порогового значения переключения, которое для серий КМОП принято считать равным половине напряжения питания $U_{пор} = 0,5U_{п}$, начинается переключение первого логического элемента $DD1$ в состояние логического нуля, а второго логического элемента $DD2$ – в состояние логической единицы. Напряжение на выходе второго логического элемента повышается и через цепь положительной обратной связи $R1-R2$ передается на вход первого логического элемента. За счет этого процесс ускоряется и приобретает лавинообразный характер, выходное напряжение скачкообразно увеличивается практически до напряжения питания.

Напряжение срабатывания можно определить по формуле

$$U_{cp} = \frac{U_n}{2} \frac{R1 + R2}{R2}. \quad (6.5)$$

При уменьшении входного напряжения до величины напряжения отпущения протекает лавинообразный процесс возврата триггера в исходное состояние.

Напряжение отпущения можно определить по формуле

$$U_{отп} = \frac{E_k R_3}{R_3 + R_{к1}} + U_{пор}. \quad (6.6)$$

6.3. Порядок выполнения работы

6.3.3. Соберите схему для исследования триггера Шмитта, изображенную на рис. 6.5. Данная схема отличается от изображенной на рис. 6.2 отсутствием цепи смещения в базовой цепи первого транзистора, поэтому формулы для напряжения срабатывания принимают упрощенный вид

$$U_{cp} = \frac{E_k R_3}{R_{к2} + R_3} + U_{пор}. \quad (6.7)$$

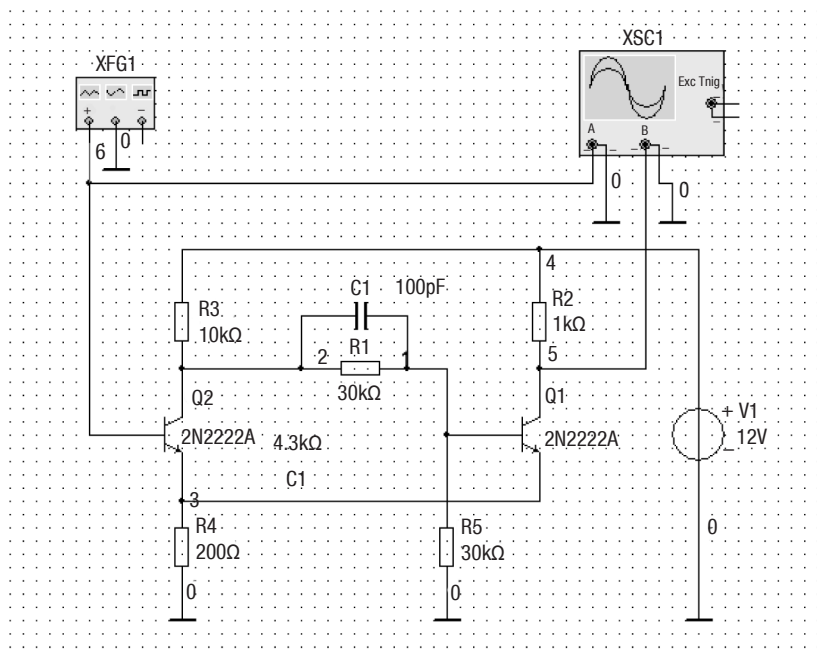


Рис. 6.5. Схема для исследования триггера Шмитта на биполярных транзисторах

6.3.4. Установите синусоидальную форму выходного напряжения функционального генератора, частоту 2 кГц, амплитуду 5 В, а смещение – 0 В.

6.3.5. Установите следующие настройки осциллографа:

- масштаб по каналам *A* и *B* – 5 В/дел.;
- масштаб времени – 2 мс/дел.

6.3.6. Активизируйте схему клавишей «Пуск». Смещение по каналам *A* и *B* отрегулируйте так, чтобы осциллограмма входного сигнала располагалась выше осциллограммы выходного сигнала. Срисуйте с экрана осциллографа в масштабе 1:1 диаграммы изменения входного и выходного сигналов. С помощью маркеров определите величину напряжений срабатывания и отпускания триггера (по каналу *A*), соответствующих этим моментам напряжений на выходе триггера (по каналу *B*), и длительность выходного импульса.

6.3.7. Измените амплитуду входного сигнала по указанию преподавателя и повторите опыт аналогично п. 6.3.6.

6.3.8. Восстановите исходную амплитуду входного сигнала и измените величину сопротивления в цепи эмиттера по указанию преподавателя. Повторите опыт аналогично п. 6.3.6.

6.3.9. Соберите схему триггера Шмитта на логических элементах (рис. 6.6).

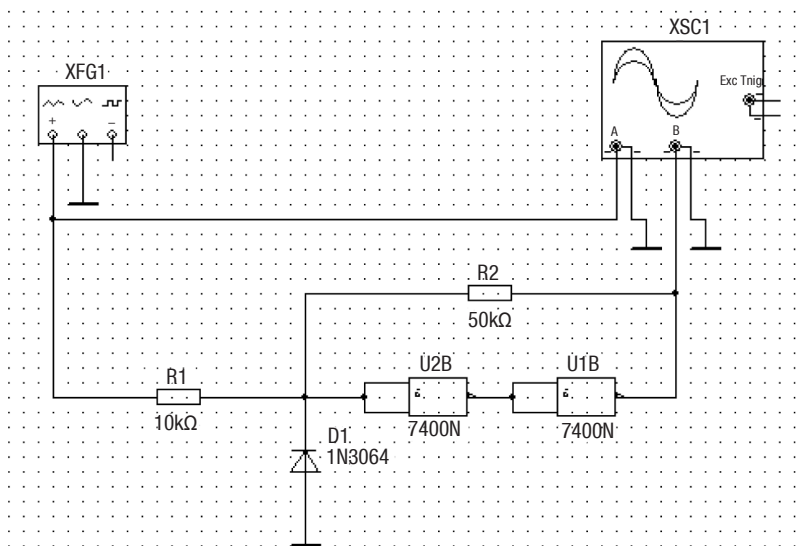


Рис. 6.6. Схема для изучения триггера Шмитта на логических элементах

Установите настройки генератора и осциллографа в соответствии с п. 6.3.4 и 6.3.5.

6.3.10. Повторите опыты аналогично п. 6.3.6, 6.3.7.

6.3.11. Измените величины сопротивлений $R1$ и $R2$ по указанию преподавателя и повторите опыты аналогично п. 6.3.6.

6.4. Обработка результатов

6.4.1. Постройте осциллограммы входного и выходного сигналов для всех проведенных опытов с указанием на осях значений напряжений и времени.

6.4.2. Рассчитайте напряжения срабатывания и отпускания для каждого опыта по формулам (6.4) и (6.5) для триггера Шмитта на биполярных транзисторах и по формулам (6.6) и (6.7) для триггера Шмитта на логических элементах.

6.5. Содержание выводов

6.5.1. Объясните влияние амплитуды входного сигнала на длительность выходного импульса и влияние сопротивления в цепи эмиттера на длительность и амплитуду выходного импульса (для триггера на биполярных транзисторах).

6.5.2. Объясните влияние амплитуды входного сигнала на длительность выходного импульса и сопротивлений R_1 и R_2 на напряжения срабатывания и отпускания и на длительность выходного импульса (для триггера на интегральных микросхемах).

6.5.3. Сравните опытные и расчетные значения напряжений срабатывания и отпускания, сделайте выводы.

6.6. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- титульный лист;
- схему опыта;
- осциллограммы;
- результаты отсчетов по маркерам;
- расчеты напряжений срабатывания и отпускания;
- выводы.

6.7. Контрольные вопросы

6.7.1. Поясните принцип действия триггера Шмитта на биполярных транзисторах.

6.7.2. Изобразите статическую характеристику триггера Шмитта.

6.7.3. Изобразите диаграммы входного и выходного сигналов триггера Шмитта, поясните их вид.

6.7.4. Поясните, за счет чего процесс переключения триггера Шмитта имеет лавинообразный характер.

6.7.5. От чего зависят напряжения срабатывания и отпускания в триггере Шмитта на биполярных транзисторах?

6.7.6. Поясните принцип действия триггера Шмитта на интегральных микросхемах.

6.7.7. Объясните, как влияют сопротивления в схеме триггера Шмитта на интегральных микросхемах на параметры выходного импульса.

Лабораторная работа 7

ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОГО МУЛЬТИВИБРАТОРА

7.1. Цель работы: исследование работы автоколебательного мультивибратора на биполярных транзисторах и влияния элементов схемы на параметры выходных импульсов.

7.2. Теоретические сведения

Автоколебательные мультивибраторы предназначены для генерирования последовательности импульсов прямоугольной формы. При использовании биполярных транзисторов мультивибратор выполнен на основе двух транзисторных ключей, связанных между собой цепями положительной обратной связи (рис. 7.1). Диаграммы, на которых показано изменение напряжений в различных точках схемы, показаны на рис. 7.2.

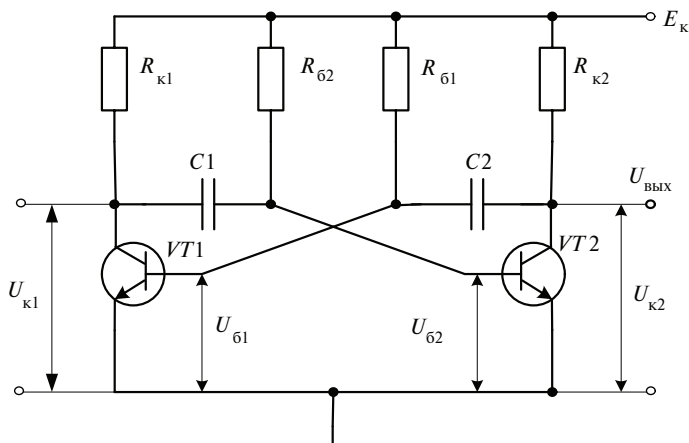


Рис. 7.1. Схема автоколебательного мультивибратора

Автоколебательный мультивибратор имеет два состояния временно устойчивого равновесия (квазиравновесия). Рассмотрение работы мультивибратора удобно начать с момента, когда транзистор $VT2$ закрылся, а $VT1$ только что открылся и вошел в насыщение (момент

времени t_1 на диаграмме). Конденсатор $C1$, заряженный к этому моменту времени до напряжения, близкого к напряжению питания E_k (плюс на левой обкладке, минус на правой), через открытый транзистор $VT1$ подключается параллельно переходу «база-эмиттер» транзистора $VT2$. Напряжение между базой и эмиттером скачком уменьшится до величины, равной напряжению на конденсаторе $C1$, причем минусом это напряжение прикладывается к базе, является запирающим для транзистора $VT2$ и поддерживает его в закрытом состоянии.

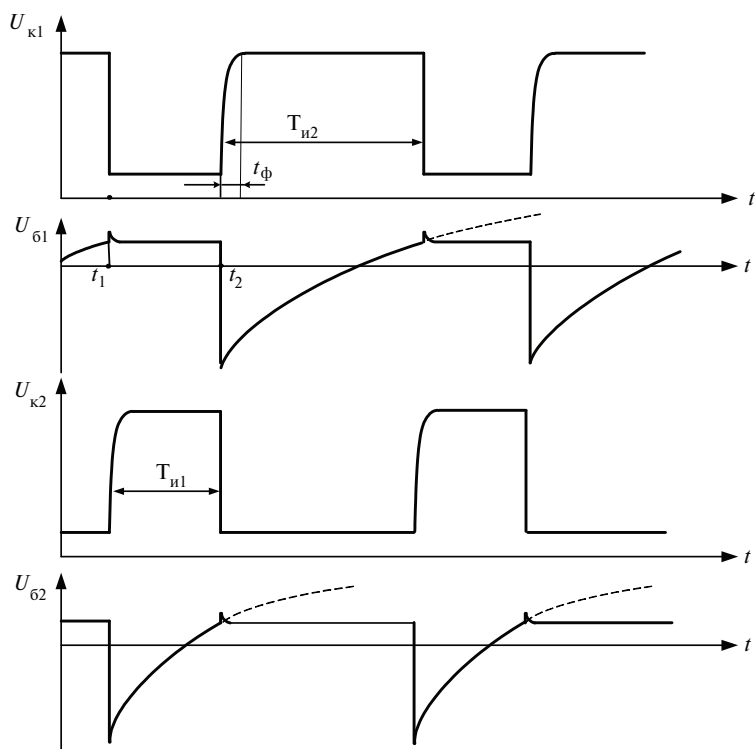


Рис. 7.2. Диаграммы напряжений в автоколебательном мультивибраторе

Далее конденсатор $C1$ начинает перезаряжаться по цепи:

« $+E_k - R_{61} - C1$ — открытый транзистор $VT1$ — нулевая шина».

Напряжение на базе транзистора $VT2$ будет стремиться от исходного значения « $-E_k$ » к напряжению питания « $+E_k$ » по экспоненци-

альному закону с постоянной времени перезаряда $\tau_1 = C1R_{61}$. Одновременно, начиная с момента времени t_1 , конденсатор $C2$ заряжается до напряжения $+E_k$ по цепи:

« $+E_k - R_{к2} - C2$ – сопротивление «база эмиттер $VT1$ » – нулевая шина».

Постоянная времени заряда $\tau_2 = C2R_{к2}$ мала по сравнению с постоянной времени перезаряда, поэтому процесс заряда происходит достаточно быстро. Напряжение на коллекторе транзистора $VT2$, начиная с того же момента времени t_1 , увеличивается с постоянной времени заряда $\tau_2 = C2R_{к2}$ до значения « $+E_k$ ». В процессе перезаряда конденсатора $C1$ увеличивается напряжение на базе $VT2$ и в момент времени t_2 , когда оно достигнет порога отпирания, равного для кремниевых транзисторов 0,6 В, транзистор $VT2$ начинает отпираться. Интервал времени от t_1 до t_2 соответствует формированию прямоугольного импульса на коллекторе транзистора $VT2$. Длительность $T_{и1}$ этого импульса определяется формулой

$$T_{и1} = C1R_{62} 2\ln \frac{2E_k}{E_k - U_{пор}}. \quad (7.1)$$

При отпирании транзистора $VT2$ ранее заряженный конденсатор $C2$ подключается параллельно к участку база-эмиттер транзистора $VT1$ минусом к базе, а плюсом к эмиттеру через открытый транзистор $VT2$. Транзистор $VT1$ при этом закрывается, начинается процесс формирования прямоугольного импульса длительностью $T_{и2}$ на коллекторе $VT1$. Длительность импульса определяется по формуле

$$T_{и2} = C2R_{61} \ln \frac{2E_k}{E_k - U_{пор}}. \quad (7.2)$$

Величину $U_{пор}$ для кремниевых транзисторов можно принять равной 0,6...0,8 В.

Период генерируемой последовательности импульсов равен $T = T_{и1} + T_{и2}$.

Для изменения длительности импульсов и их периода следует изменять номиналы хранирующих элементов $C1$, $C2$, R_{61} , R_{62} .

7.3. Порядок выполнения работы

7.3.1. Соберите схему, показанную на рис. 7.3.

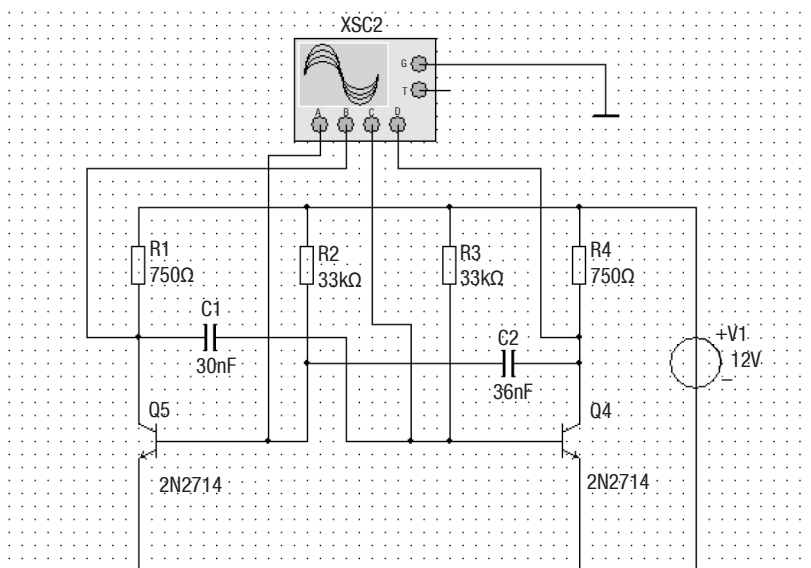


Рис. 7.3. Схема для исследования автоколебательного мультивибратора

7.3.2. Активизируйте схему. Выберите масштабы представления напряжений и с помощью функции смещения разверток по вертикали расположите диаграммы сигналов сверху вниз в последовательности подключения каналов осциллографа $A - B - C - D$.

7.3.3. Срисуйте с экрана осциллографа временные диаграммы напряжений на базах и коллекторах транзисторов. С помощью маркеров определите длительность и амплитуду импульсов на коллекторах транзисторов, а также длительность фронтов импульсов.

7.3.4. Измените параметры элементов схемы по указанию преподавателя и повторите опыт аналогично п. 7.3.3.

7.3.5. Восстановите исходные значения параметров схемы и установите напряжение питания 5 В. Повторите опыт аналогично п. 7.3.3.

7.4. Обработка результатов

7.4.1. Постройте в масштабе диаграммы изменения напряжений для всех комбинаций параметров схемы с указанием длительностей импульсов и фронтов импульсов и их амплитуд. Для правильного изображения осей времени, соответствующих нулевым напряжени-

ям, следует использовать показания величин напряжений, определенных по маркерам.

7.4.2. Для каждой комбинации рассчитайте длительности импульсов по формулам (7.1) и (7.2).

7.5. Содержание выводов

7.5.1. Сравните результаты расчетов длительностей импульсов с опытными результатами и объясните причины различий.

7.5.2. Объясните влияние параметров хронизирующих элементов на длительность выходных импульсов.

7.5.3. Объясните причины отклонений формы выходных импульсов от идеальной прямоугольной.

7.6. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- цель работы;
- схему опыта;
- осциллограммы напряжений;
- отсчеты напряжений и времен, сделанные по маркерам;
- расчеты длительностей импульсов;
- выводы.

7.7. Контрольные вопросы

7.7.1. Изобразите схему автоколебательного мультивибратора на биполярных транзисторах.

7.7.2. Поясните принцип действия мультивибратора на биполярном транзисторе.

7.7.3. Изобразите диаграммы напряжений на коллекторах и базах в автоколебательном мультивибраторе.

7.7.4. Объясните, от чего зависит длительность импульсов в автоколебательном мультивибраторе.

7.7.5. Поясните причину появления фронтов выходных импульсов.

7.7.6. Объясните, от чего зависит длительность фронтов выходных импульсов.

7.7.7. Напишите формулы для определения длительностей импульсов на коллекторах транзисторов и поясните их физический смысл.

Лабораторная работа 8

ИССЛЕДОВАНИЕ ЖДУЩЕГО МУЛЬТИВИБРАТОРА НА ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМАХ

8.1. Цель работы: исследование работы ждущего мультивибратора на интегральных микросхемах и влияния параметров схемы на его работу.

8.2. Теоретические сведения

Ждущие мультивибраторы предназначены для формирования единичного импульса прямоугольной формы при подаче на вход короткого запускающего импульса и могут быть выполнены на дискретных транзисторах и интегральных микросхемах. Схема мультивибратора на логических инверторах и схеме логического умножения изображена на рис. 8.2.

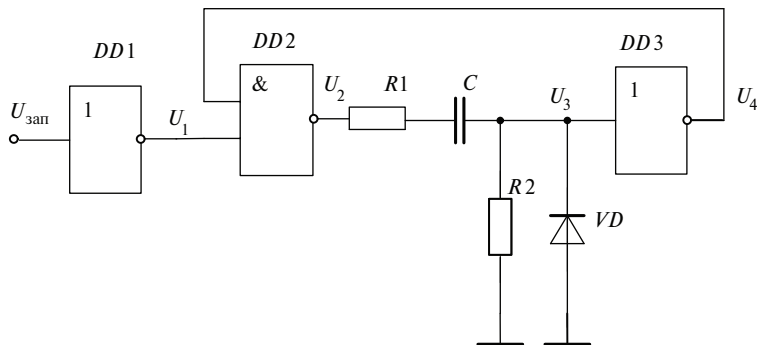


Рис. 8.1. Схема ждущего мультивибратора

Работа ждущего мультивибратора отображена на рис. 8.2, где показаны диаграммы изменения сигналов во времени при запуске мультивибратора.

В исходном состоянии запускающее напряжение $U_{\text{зап}}$ равно напряжению логического нуля, напряжения U_1 и U_4 равны напряжению логической единицы. Напряжение на выходе элемента 2И-НЕ в соответствии с его логической функцией равно напряжению низ-

кого уровня, соответствующего логическому нулю, конденсатор C заряжен до напряжения низкого уровня, соответствующего логическому нулю. Схема находится в состоянии ожидания.

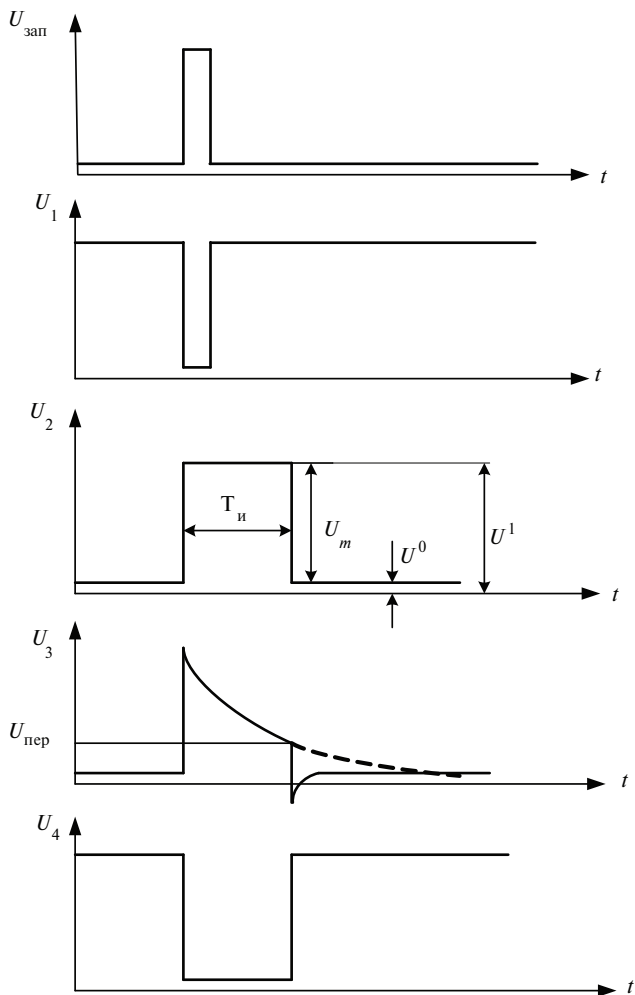


Рис. 8.2. Диаграммы изменения напряжений в ждущем мультивибраторе

При поступлении запускающего импульса $U_{\text{зап}}$ элемент 2И-НЕ меняет свое состояние, напряжение на его выходе увеличивается до напряжения логической единицы. Конденсатор C начинает заряжаться под действием этого напряжения, поэтому напряжение U_3 скачком увеличивается в первый момент до напряжения логической единицы, элемент типа «НЕ» переключается в состояние логического нуля. Под действием напряжения U_4 элемент 2И-НЕ остается в новом состоянии даже после окончания запускающего импульса. Далее в процессе заряда конденсатора напряжение U_3 по экспоненциальному закону стремится к нулю. При уменьшении этого напряжения до величины напряжения переключения $U_{\text{пер}}$ элемент НЕ возвращается в исходное состояние, что приводит к переключению элемента 2И-НЕ также в исходное состояние. Конденсатор разряжается с малой постоянной времени через диод, ограничительное сопротивление R_1 , внутреннее сопротивление элемента 2И-НЕ и диод VD . Схема приходит в режим ожидания.

В результате формируется прямоугольный импульс с амплитудой, равной разности напряжений логической единицы и логического нуля $U_m = U^1 - U^0$ на выходе логического элемента 2И-НЕ. Одновременно формируется прямоугольный импульс на выходе логического инвертора с противоположными логическими уровнями и той же амплитудой.

Длительность прямоугольного импульса зависит от постоянной времени заряда и величины напряжения переключения, которое определяется серией примененных микросхем. Для серий ТТЛ это напряжение принято считать равным 1,5 В, а для серий КМОП – равным половине напряжения питания.

С учетом этого длительность импульса можно рассчитать по формуле

$$T_{\text{и}} = C \cdot R_2 \cdot \ln \frac{U^1}{U_{\text{пер}}} \quad (8.1)$$

8.3. Порядок выполнения работы

8.3.1. Соберите схему для проведения опытов, показанную на рис. 8.3.

8.3.2. Активизируйте схему. Выберите масштабы представления напряжений и с помощью функции смещения разверток по вертикали расположите диаграммы сигналов сверху вниз в последовательности подключения каналов осциллографа $A - B - C - D$.

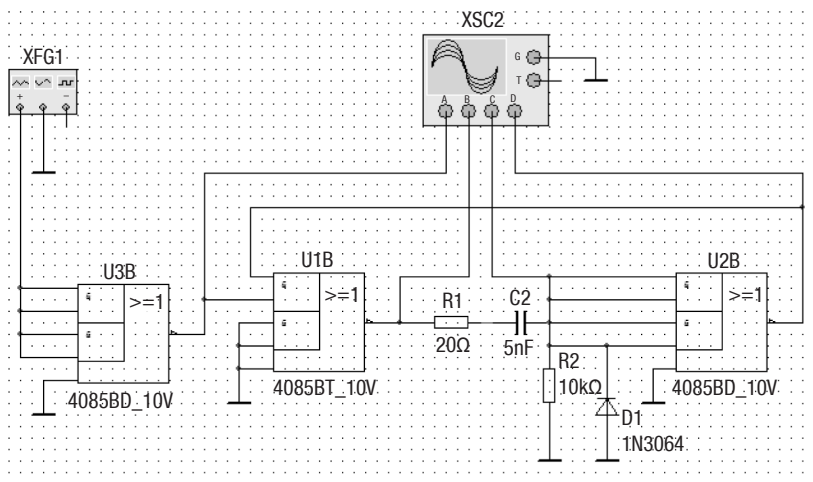


Рис. 8.3. Схема для исследования ждущего мультивибратора

8.3.3. Срисуйте с экрана осциллографа временные диаграммы напряжений на входах и выходах логических элементов. С помощью маркеров определите длительность и амплитуду импульсов на выходах элементов. Запишите масштабы представления напряжений и времени.

8.3.4. Измените параметры элементов схемы по указанию преподавателя и повторите опыт аналогично п. 8.3.3.

8.4. Обработка результатов

8.4.1. Постройте в масштабе диаграммы изменения напряжений для всех комбинаций параметров схемы с указанием длительностей импульсов. Для правильного изображения осей времени, соответствующих нулевым напряжениям, следует использовать показания величин напряжений, определенных по маркерам.

8.4.2. Для каждой комбинации рассчитайте длительности импульсов по формуле (8.1).

8.5. Содержание выводов

8.5.1. Сравните результаты расчетов длительностей импульсов с опытными результатами и объясните причины различий.

8.5.2. Объясните влияние параметров хранирующих элементов на длительность выходных импульсов.

8.6. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- цель работы;
- схему опыта;
- осциллограммы напряжений;
- отсчеты напряжений и времен, сделанные по маркерам;
- расчеты длительностей импульсов;
- выводы.

8.7. Контрольные вопросы

8.7.1. Изобразите схему ждущего мультивибратора на логических элементах.

8.7.2. Изобразите диаграммы напряжений на входах и выходах логических элементов.

8.7.3. Поясните принцип действия мультивибратора на логических элементах.

8.7.4. Объясните, от чего зависит длительность импульсов в ждущем мультивибраторе.

Лабораторная работа 9

ИССЛЕДОВАНИЕ СЧЕТЧИКОВ ИМПУЛЬСОВ И РЕГИСТРОВ СДВИГА

9.1. Цель работы: проверка работы счетчиков в режимах сложения и вычитания, изучение работы регистров сдвига в различных режимах.

9.2. Краткие теоретические сведения

9.2.1. Счетчики импульсов

Счетчики импульсов предназначены для подсчета числа импульсов, поступивших на вход счетчика, и запоминания его в виде двоичного кода. Структура счетчика любой разновидности включает в себя цепочку, состоящую из m счетных триггеров, соединенных последовательно. В качестве счетных триггеров используются в основном двухступенчатые JK - или D -триггеры в счетном режиме. В каждом триггере фиксируется определенный разряд двоичного числа, причем состояние прямого выхода триггера соответствует значению этого разряда. Типовая структура счетчика представлена на рис. 9.1.

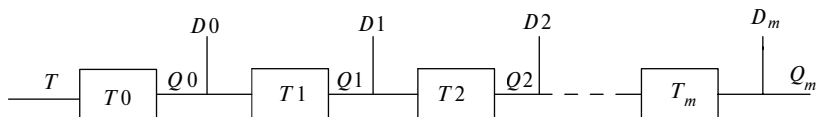


Рис. 9.1. Структурная схема счетчика импульсов

Число триггеров в структуре определяет разрядность двоичного числа, определяющего максимальное число поданных импульсов. Соответствующее десятичное число можно определить по формуле

$$M = Q_m \cdot 2^m + Q_{m-1} \cdot 2^{m-1} + \dots + Q_0 \cdot 2^0. \quad (9.1)$$

Одним из основных параметров счетчика импульсов является модуль, или коэффициент счета, который представляет собой число всех возможных состояний счетчика. По модулю счета счетчики можно разделить на двоичные, десятичные, счетчики с любым произвольным коэффициентом счета и счетчики с переменным

коэффициентом счета. Модуль счета двоичных счетчиков равен 2^m , где m — число триггеров, а десятичных — 10^n , где n — любое целое число. В счетчиках с произвольным коэффициентом счета определенная величина модуля счета может быть получена при помощи специальных приемов организации структуры счетчика, а в счетчиках с переменным коэффициентом счета последний может изменяться в процессе работы счетчика при помощи управляющих команд.

По способу переноса информации счетчики разделяются на счетчики с последовательным переносом, параллельным переносом, комбинированным переносом и на кольцевые счетчики. Далее рассмотрим некоторые распространенные структуры счетчиков.

Асинхронный суммирующий счетчик с последовательным переносом

Структура четырехразрядного счетчика и его графическое изображение даны на рис. 9.2. Счетчик обозначается буквами *СТ*, после которых стоит число, равное модулю счета. Вход *T* является информационным счетным входом, на него подаются импульсы, подлежащие счету. Вход *R* используется для обнуления всех разрядов счетчика перед началом работы.

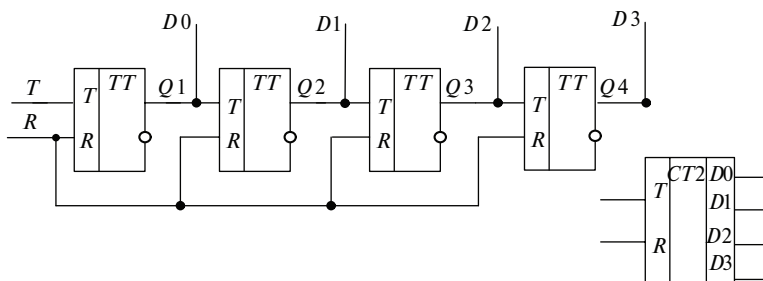


Рис. 9.2. Структура асинхронного суммирующего счетчика с последовательным переносом и его графическое изображение

Временная диаграмма работы такого счетчика изображена на рис. 9.3.

Как видно из временной диаграммы, на прямых выходах триггеров в процессе поступления импульсов на вход *T* накапливается двоичный код $D_3D_2D_1D_0$, соответствующий числу поступивших импульсов. На диаграмме показан процесс счета до момента времени, когда

число поступивших импульсов составит 15, а во всех разрядах счетчика будут логические единицы. Тогда на шестнадцатом импульсе счетчик автоматически перейдет в нулевое состояние и общее число состояний счетчика будет равно 16, т. е. 2^4 .

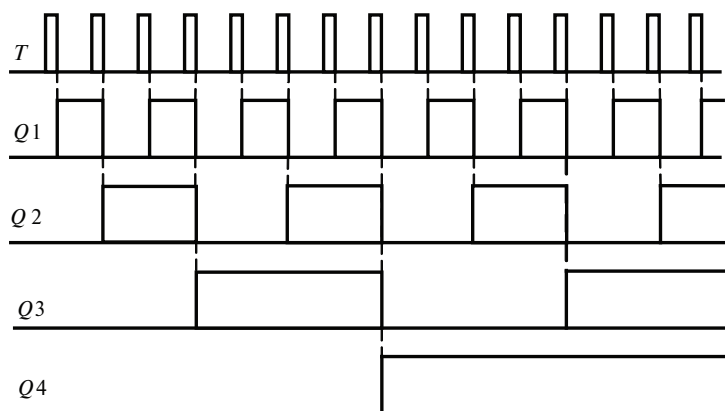


Рис. 9.3. Временная диаграмма работы асинхронного суммирующего счетчика

На основе двоичного счетчика можно получить счетчик с любым модулем счета. Простейшая схемная реализация такого счетчика основана на введении дополнительных обратных связей, используемых для обнуления счетчика при определенном числе поступивших на его вход импульсов. Например, для получения модуля счета, равного 10, необходимо использовать четырехразрядный счетчик, выходы второго и четвертого триггеров которого соединены со схемой «И» (&), вырабатывающей сигнал на обнуление счетчика при появлении в нем комбинации 1010 (рис. 9.4).

Недостатками счетчиков с последовательным переносом следует считать то, что переключение триггеров происходит последовательно во времени, это затягивает процесс переключения, и, кроме того, в связи с инерционностью элементов схемы могут возникать кратковременные ложные комбинации на выходах триггеров.

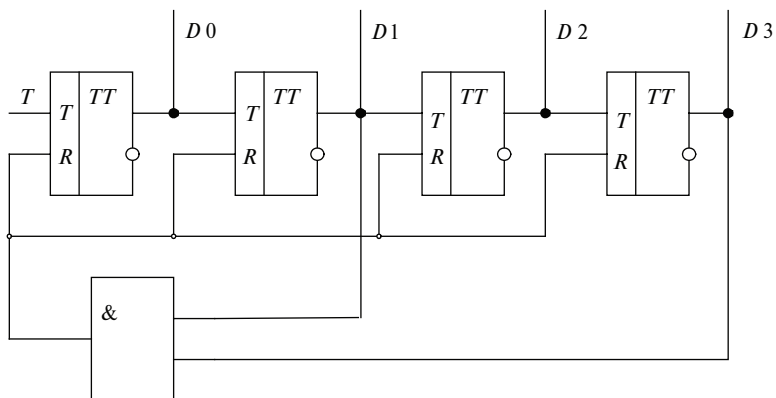


Рис. 9.4. Счетчик с модулем счета 10

Асинхронный вычитающий счетчик с последовательным переносом

Для реализации счетчика, в котором двоичное число уменьшается при поступлении входных импульсов, применяются инверсные выходы триггеров, связанные со счетными входами последующих триггеров. Структура трехразрядного вычитающего счетчика представлена на рис. 9.5, а временная диаграмма его работы — на рис. 9.6.

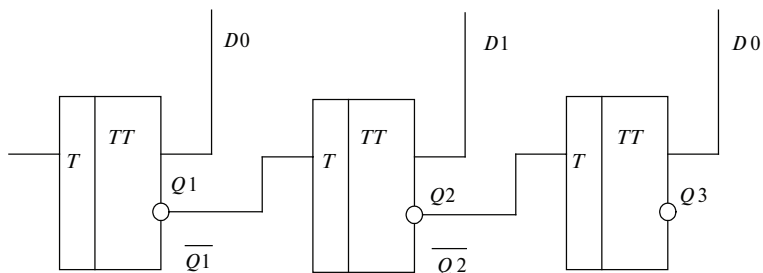


Рис. 9.5. Трехразрядный вычитающий счетчик

Состояние счетчика оценивается по прямым выходам триггеров. Максимальное число импульсов так же, как и в суммирующем счетчике, равно модулю счета. После поступления такого числа импульсов счетчик автоматически возвращается в исходное состояние, т. е. на прямых выходах всех триггеров будут логические единицы.

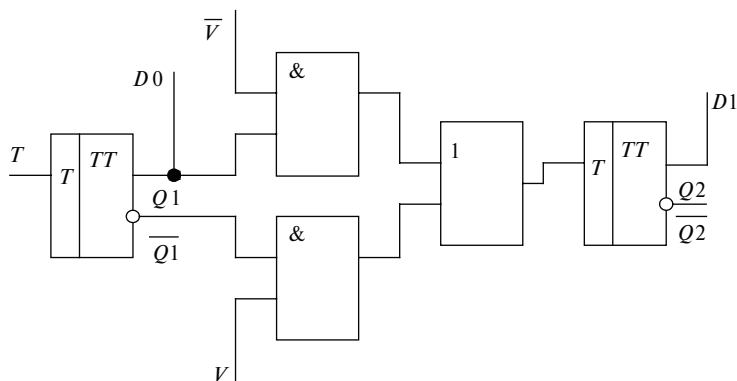


Рис. 9.7. Схема связи между триггерами в реверсивном счетчике

9.2.2. Регистры сдвига

Регистры сдвига применяются для преобразования последовательного кода в параллельный, и наоборот — параллельного в последовательный, реализации арифметических и логических операций, записи, хранения и считывания информации, поступающей как в виде последовательного, так и параллельного кода. В качестве основных элементов регистров применяются чаще всего двухступенчатые D -триггеры. Число триггеров определяет максимальное количество разрядов обрабатываемых двоичных кодов. Сущность сдвига информации, нашедшая отражение в названии регистров, состоит в том, что с приходом каждого тактового импульса вся информация, содержащаяся в регистре, сдвигается на один разряд вправо или влево. В качестве примера рассмотрим работу четырехразрядного регистра со сдвигом вправо, структура которого представлена на рис. 9.8.

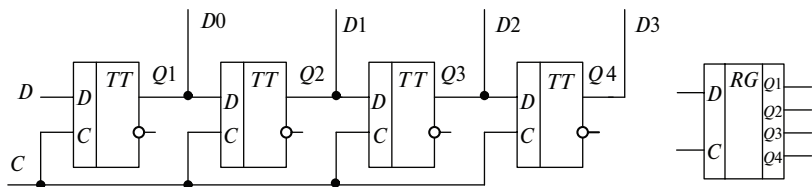


Рис. 9.8. Четырехразрядный регистр со сдвигом вправо и его условное графическое изображение

Пусть, например, на вход D регистра поступает последовательный (т. е. по одной шине со сдвигом сигнала каждого разряда во времени) двоичный код 1011. Исходное состояние регистра примем нулевое. Тогда после первого тактового импульса в первом триггере запишется логическая единица старшего разряда, а в остальных — останутся логические нули. После второго тактового импульса в первый триггер запишется логический нуль, а единица из него переписывается во второй триггер, таким образом, информация сдвинется вправо на одну триггерную ячейку. Аналогично будет происходить запись информации и ее сдвиг с каждым тактовым импульсом. После четырех тактовых импульсов в регистре окажется записанным четырехразрядный двоичный код 1011, причем старший разряд запишется в четвертом триггере, а младший — в первом. После этого информация может быть считана без ее потери в регистре в виде параллельного кода по четырем шинам с прямых выходов триггеров. Если же требуется считать информацию в виде последовательного кода, то она может быть получена с выхода четвертого триггера при подаче еще четырех тактовых импульсов.

Для того чтобы получить сдвиг информации влево, требуется прямой выход каждого триггера связать с входом D предыдущего триггера.

Для записи информации в виде параллельного кода следует в триггерах регистра выполнить дополнительные входы для подачи на них сигналов, соответствующих разрядам записываемого двоичного кода.

9.3. Порядок выполнения работы

9.3.1. Для исследования реверсивного асинхронного четырехразрядного двоичного счетчика соберите схему, изображенную на рис. 9.9.

Для переключения счетчика из режима сложения в режим вычитания служит RS -триггер $U5$, состоянием которого управляет переключатель “ U ”. Если он находится в верхнем положении, то счетчик работает в режиме суммирования, если в нижнем — в режиме вычитания. Состояние триггеров счетчика определяется по индикаторам, подключенным к прямым выходам триггеров. Свечение индикатора соответствует единичному состоянию триггера, отсутствие свечения — нулевому.

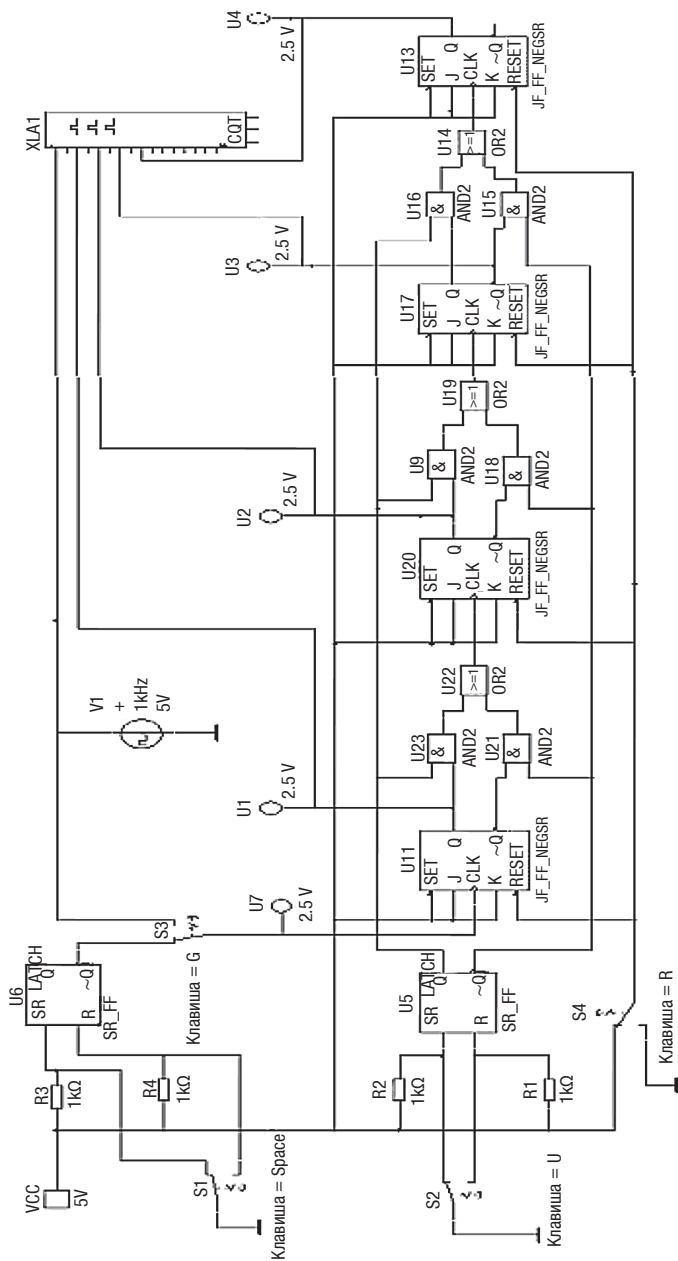


Рис. 9.9. Схема для изучения двоичного счетчика импульсов

Для исследования работы счетчика в статическом режиме на вход S первого триггера подаются импульсы с инверсного выхода RS -триггера U_6 , управляемого переключателем $S_{расе}$. Переключатель G в это время должен находиться в левом по схеме положении. Красный индикатор индицирует состояние входного сигнала. В правом положении переключателя G на счетчик подается сигнал от генератора прямоугольных импульсов $И1$, при этом на экране логического анализатора можно наблюдать форму напряжения на входе и всех выходах счетчика. Поскольку в счетчике используются JK -триггеры с инверсными асинхронными входами, сброс триггеров счетчика производится подачей на входы R логического нуля, для этого переключатель R следует перевести в нижнее положение, а затем вернуть в верхнее.

9.3.2. Изучите работу счетчика в режиме суммирования. Для этого установите переключатель U в верхнее положение, затем, подавая на вход счетчика клавишей $S_{расе}$ одиночные импульсы, определите по свечению выходных индикаторов состояния триггеров и заполните табл. 9.1.

9.3.3. Проверьте работу счетчика в режиме вычитания, для чего переключатель U переведите в нижнее положение и повторите измерения п.5.2.2. Сделайте выводы.

9.3.4. Проверьте работу счетчика в динамическом режиме, для чего переключатель G переведите в правое положение. Установите частоту тактового генератора $Clock$ 1 кГц, тактовую частоту и развертку логического анализатора 10 кГц и 15 кГц соответственно. Получите и срисуйте с экрана логического анализатора временные диаграммы входных и выходных сигналов счетчика в режиме суммирования и вычитания.

Таблица 9.1

N	Индикатор 1	Индикатор 2	Индикатор 3	Индикатор 4
0	0	0	0	0
1	1	0	0	0
...
15	1	1	1	1
16	0	0	0	0

9.3.5. Соберите схему суммирующего счетчика по модулю 10, изображенную на рис.9.10, и исследуйте его работу аналогично предыду-

щему счетчику. В данном счетчике используются *D*-триггеры в счетном режиме с прямыми (а не инверсными) асинхронными входами, поэтому сброс счетчика осуществляется кратковременной подачей на входы *R* при помощи переключателя *R* логической единицы.

9.3.6. Соберите схему универсального регистра сдвига, изображенную на рис. 9.11. Переключатели *A*, *B*, *C* служат для установки кода числа, которое можно записать в триггеры регистра (левое положение – 0, правое – 1). Для записи установленного числа нужно перевести переключатель 2 в правое положение. Переключатель 4 превращает регистр в кольцевой при сдвиге влево, 3 – при сдвиге вправо. *RS*-триггер *U4*, управляемый переключателем 1, служит для переключения сдвига влево – вправо. С помощью переключателя *Space* и *RS*-триггера *U3* формируются тактовые импульсы для работы регистра.

9.3.7. Установите регистр в режим работы «Сдвиг вправо». Для этого переключатель 1 переведите в верхнее положение, а переключатели 3 и 4 – в нижнее.

Переключателями *A*, *B*, *C* установите некоторый код числа и запишите его в триггеры регистра, действуя переключателем 2. Верните переключатель 2 в исходное положение и затем, нажимая *Space*, подавайте на регистр тактовые импульсы. Результаты занесите в табл. 9.2.

Таблица 9.2

N	Индикатор 1	Индикатор 2	Индикатор 3
0 (исходное состояние)			
1			
2			
...			
...			

9.3.8.. Установите регистр в режим работы «Сдвиг влево». Для этого переключатели 1, 3 и 4 переведите в нижнее положение. Повторите действия п. 9.3.7.

9.3.9. Установите регистр в режим работы «Кольцевой сдвиг вправо». Для этого переключатели 1 и 3 переведите в верхнее положение, а переключатель 4 – в нижнее. Повторите действия п. 9.3.7.

9.3.10. Установите регистр в режим работы «Кольцевой сдвиг влево». Для этого переключатели 1 и 3 переведите в нижнее положение, а переключатель 4 – в верхнее. Повторите действия п. 9.3.7.

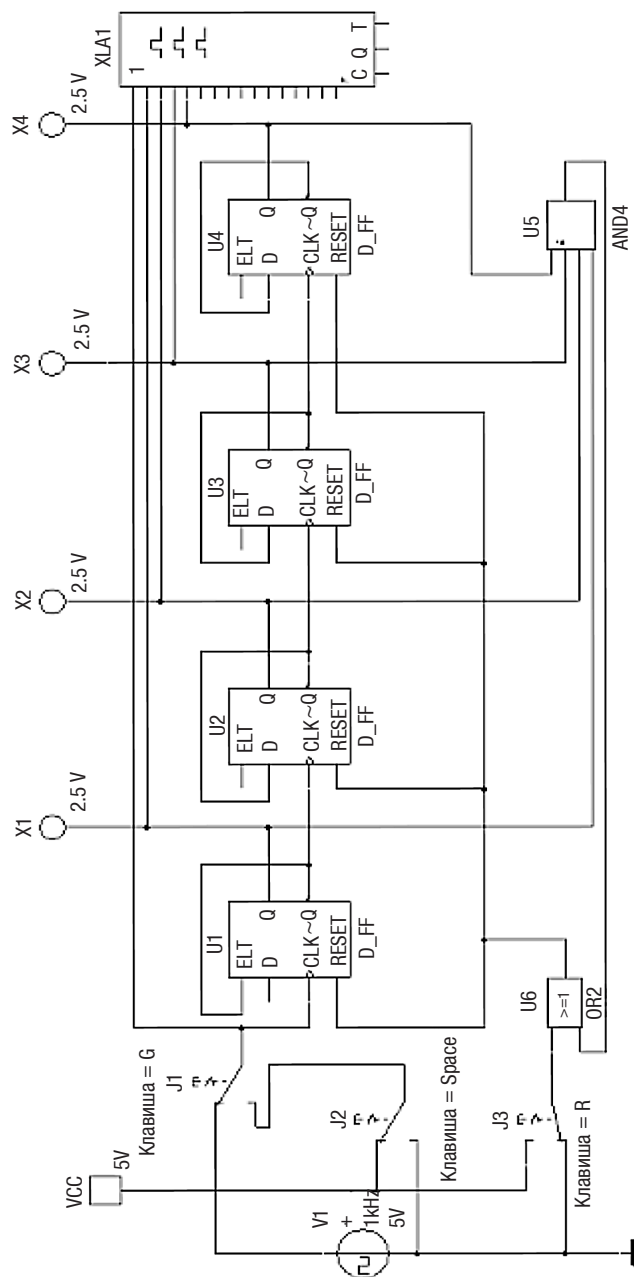


Рис. 9.10. Схема для изучения десятичного счетчика импульсов

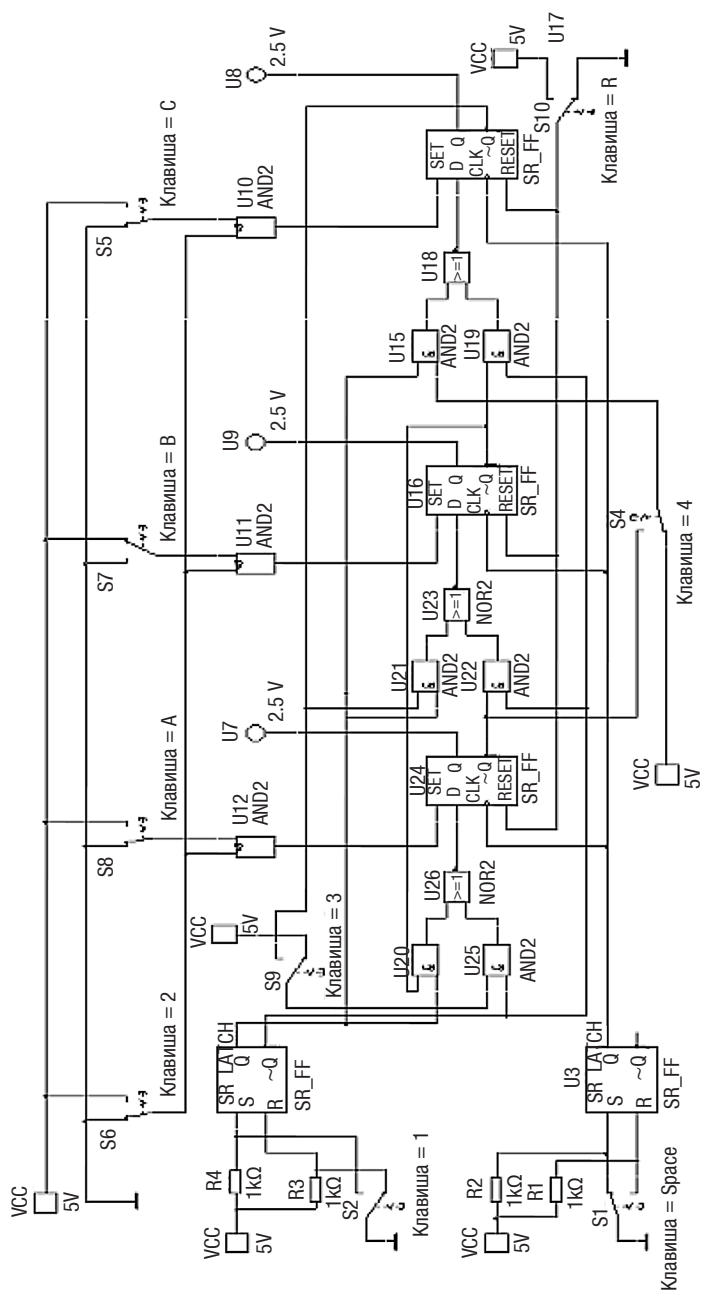


Рис. 9.11. Схема для изучения регистра сдвига

9.4. Содержание выводов

9.4.1. Объясните, как в опытах реализуются режимы сложения и вычитания в счетчиках импульсов.

9.4.2. Объясните, каким образом реализуется реверсивный режим работы счетчика.

9.4.3. Объясните, каким образом в регистре реализуются режимы сдвига вправо и влево и кольцевой режим.

9.5. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- цель работы;
- исследуемые схемы;
- таблицы с полученными результатами;
- выводы.

9.6. Контрольные вопросы

9.6.1. Классификация и типы счетчиков импульсов.

9.6.2. Асинхронный счетчик с последовательным переносом. Схема, принцип действия, достоинства и недостатки.

9.6.3. Синхронный счетчик с параллельным переносом. Схема, принцип действия, достоинства и недостатки.

9.6.4. Реверсивные счетчики. Варианты схем, структура, принцип действия.

9.6.5. Регистры сдвига. Основная схема, принцип действия. Регистры со сдвигом вправо и влево.

9.6.6. Разновидности регистров (реверсивный, кольцевой, с параллельной записью). Схема, принцип действия.

Библиографический список

1. *Лачин В. И., Савелов Н. С.* Электроника. — Ростов н/Д: Феникс, 2007. — 710 с.
2. *Пасынков В. В., Чиркин Л. К.* Полупроводниковые приборы. — М.: Лань, 2009. — 479 с.
3. *Прянишников В. А.* Электроника. Курс лекций. — СПб.: Корона принт, 2002. — 415 с.
4. *Марченко А. Л.* Основы электроники. — М.: ДМК Пресс, 2009. — 296 с.
5. *Нефедов В. И.* Основы радиоэлектроники и связи. — М.: Высш. шк., 2002. — 510 с.
6. *Варзарев Ю. Н., Иванцов В. В., Спиридонов Б. Г.* Моделирование электронных схем в системе *Multisim*.—Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2008. — 81 с.
7. *Чижма С. Н.* Электроника и микросхемотехника. — М.: УМЦ ЖДТ Маршрут, 2012. — 359 с.