

**Қостанай облысы әкімдігі білім басқармасының
«Қостанай жоғары политехникалық колледжі» КМҚК
КГКП «Костанайский политехнический высший колледж»
Управления образования акимата Костанайской области**

Рассмотрено на заседании ЦМК

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора по НМР

Протокол № ____ “ __ ” ____ 20__ г.

“ __ ” ____ 20__ г.

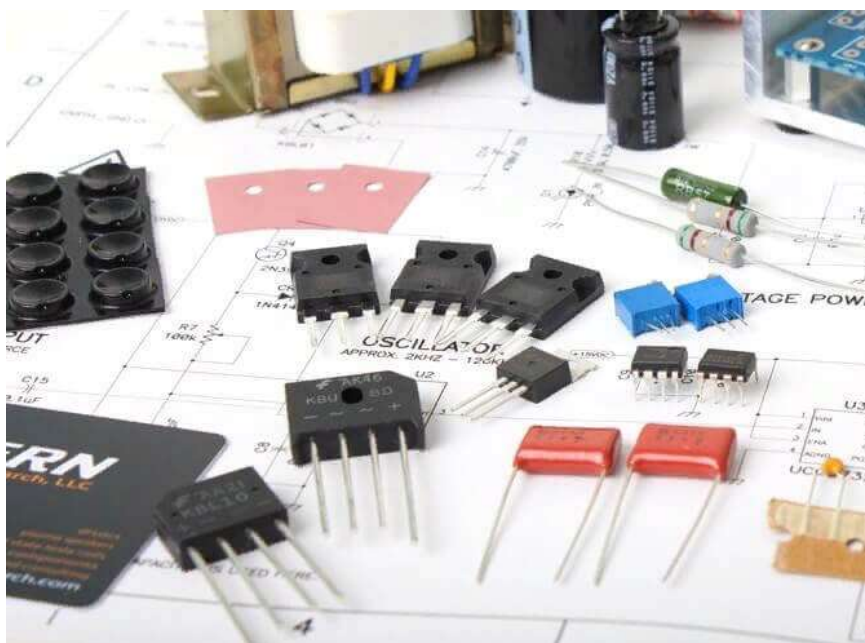
(подпись) (расшифровка подписи)

(подпись) (расшифровка подписи)

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ПО
ПРОФЕССИОНАЛЬНОМУ МОДУЛЮ**

ПМ 08 «Применение схем электронных устройств в сфере профессиональной деятельности»

Специальности 0911000 «Техническая эксплуатация, обслуживание и ремонт электрического и электромеханического оборудования» (по видам)



Костанай, 2020 г

Содержание.

Теоретическая часть

Раздел 1. Дискретные электронные приборы	3
Тема 1. Введение. Вспомогательные, пассивные элементы электронных схем.....	3
Тема 2. Ионные приборы и приборы для отображения информации.....	5
Тема 3. Общие сведения о полупроводниках. Электронно-дырочный переход. Образование и свойство p-n перехода.....	9
Тема 4. Выпрямительные, туннельные полупроводниковые диоды. Стабилитроны.....	13
Тема 5. Устройство и принцип действия транзисторов и схемы включения транзисторов (ОБ, ОЭ, ОК).....	15
Тема 6. Харак, параметры, условные обозначения схем включения транзисторов.....	17
Тема 7. Система обозначений полупроводниковых приборов.....	27
Раздел 2. Усилители. Общие сведения об усилителях	32
Тема 8. Усилительные каскады и многокаскадные усилители.....	32
Тема 9. Построение усилительного каскада.....	38
Тема 10. Граф. анализ усилительного каскада на примере схемы с общим эмиттером.....	39
Тема 11. Усилители мощности постоянного тока.....	42
Раздел 3. Источники питания и преобразовательные устройства	44
Тема 12. Неуправляемые выпрямители. Назначение и структурная схема выпрямителей..	44
Тема 13. Основные параметры управляемого выпрямителя. Однофазная, трехфазная схема выпрямителя.....	47
Тема 14. Порядок расчета выпрямителя с фильтром сглаживания.....	53
Тема 15. Стабилизаторы, фильтры сглаживания.....	55
Тема 16. Инверторы и преобразователи.....	59
Раздел 4. Генераторы импульсные устройства	68
Тема 17. Классификация генераторов. Основные параметры.....	68
Тема 18. Понятия об импульсах, формирователях импульсов.....	73
Тема 19. Мультивибраторы, одновибраторы.....	77
Тема 20. Триггеры. Триггеры на микросхемах.....	79
Тема 21. Логические элементы.....	85
Тема 22. Счетчики импульсов, дешифраторы.....	88
Тема 23. Регистры и распределительные сети.....	94
Диагностико-контролирующий блок	98
Описание проверочных испытаний в соответствии с результатами обучения (по разделам).....	98
Контрольный лист.....	102
Тестовые задания.....	104
Тематика рефератов и докладов.....	117
Вопросы для итогового контроля.....	118
Литература.....	120

Раздел 1. Дискретные электронные приборы.

Тема 1. Введение. Вспомогательные, пассивные элементы электронных схем

Элементом электрической цепи называют идеализированное устройство, отображающее какое-либо из свойств реальной электрической цепи.

Электрические цепи, в которых параметры всех элементов не зависят от величины и направлений токов и напряжений, т.е. **графики вольт-амперных характеристик (ВАХ)** элементов являются прямыми линиями, называются линейными. Соответственно такие элементы называются **линейными**.



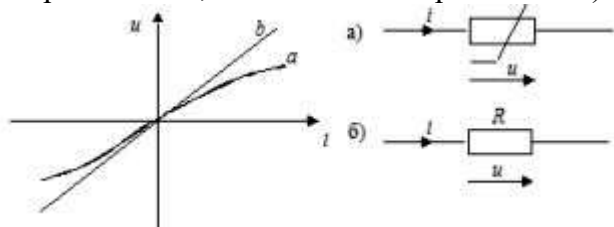
Когда параметры элементов электрической цепи существенно зависят от тока или напряжения, т.е. графики ВАХ этих элементов имеют криволинейный характер, то такие элементы называются **нелинейными**.

Если электрическая цепь содержит хотя бы один нелинейный элемент, то она является **нелинейной электрической цепью**.

В теории электрических цепей различают **активные и пассивные элементы**. Первые вносят энергию в электрическую цепь, а вторые ее потребляют.

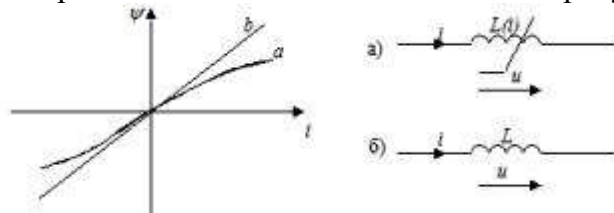
Пассивные элементы электрических цепей

Резистивным сопротивлением называется идеализированный элемент электрической цепи, обладающий свойством необратимого рассеивания энергии. Графическое изображение этого элемента и его вольт-амперная характеристика показана на рисунке (а - нелинейное сопротивление, б - линейное сопротивление).



Напряжение и ток на резистивном сопротивлении связаны между собой зависимостями: $u = iR$, $i = Gu$. Коэффициенты пропорциональности R и G в этих формулах называются соответственно **сопротивлением** и **проводимостью** и измеряются в омах [Ом] и сименсах [См]. $R = 1/G$.

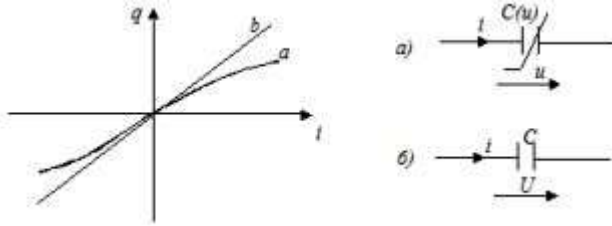
Индуктивным элементом называется идеализированный элемент электрической цепи, обладающий свойством накопления им энергии магнитного поля. Графическое изображение этого элемента показано на рисунке (а - нелинейного, б - линейного).



Линейная индуктивность характеризуется линейной зависимостью между потокосцеплением ψ и током i , называемой вебер-амперной характеристикой $\psi = Li$. Напряжение и ток связаны соотношением $u = d\psi/dt = L(di/dt)$

Коэффициент пропорциональности L в формуле и называется индуктивностью и измеряется в генри (Гн).

Емкостным элементом (емкостью) называется идеализированный элемент электрической цепи, обладающий свойством накапливания энергии электрического поля. Графическое изображение этого элемента показано на рисунке. (а - нелинейного, б - линейного).



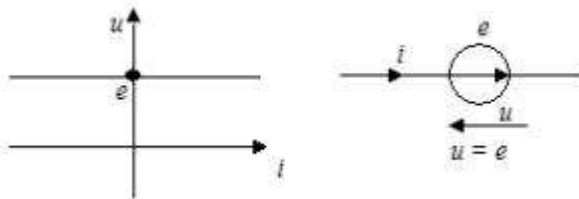
Линейная емкость характеризуется линейной зависимостью между зарядом и напряжением, называемой **кулон-вольтовой характеристикой** $q = Cu$

Напряжение и ток емкости связаны соотношениями $i = dq/dt = C(du/dt)$.

Активные элементы электрических цепей

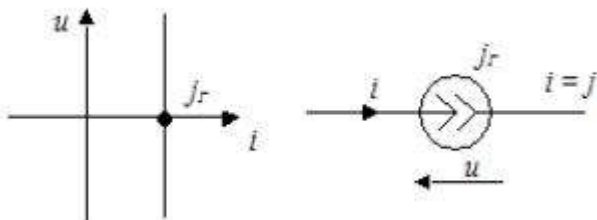
Активными называются элементы цепи, которые отдают энергию в цепь, т.е. источники энергии. Существуют **независимые и зависимые источники**. Независимые источники: источник напряжения и источник тока.

Источник напряжения - идеализированный элемент электрической цепи, напряжение на зажимах которого не зависит от протекающего через него тока.



Внутреннее сопротивление идеального источника напряжения равно нулю.

Источник тока – это идеализированный элемент электрической цепи, ток которого не зависит от напряжения на его зажимах.

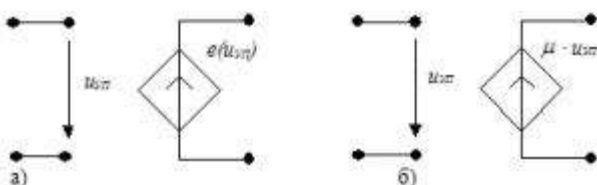


Внутреннее сопротивление идеального источника тока равно бесконечности.

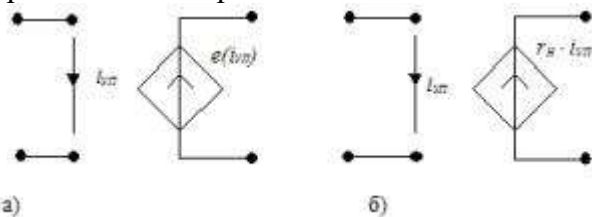
Источники напряжения (тока) называются **зависимыми (управляемыми)**, если величина напряжения (тока) источника зависит от напряжения или тока другого участка цепи. Зависимыми источниками моделируются электронные лампы, транзисторы, усилители, работающие в линейном режиме.

Различают четыре типа зависимых источников.

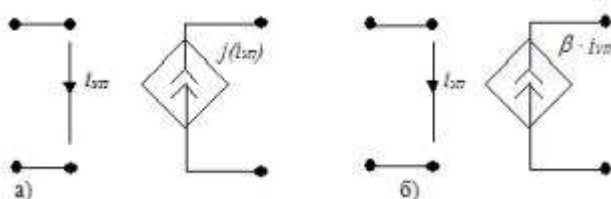
1. ИМУН – источник напряжения, управляемый напряжением: а) нелинейный, б) линейный, μ – коэффициент усиления напряжения



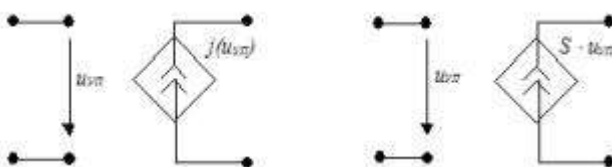
2. ИНУТ - источник напряжения, управляемый током: а) нелинейный, б) линейный, r_H – передаточное сопротивление



3. ИТУТ – источник тока, управляемый током: а) нелинейный, б) линейный, β – коэффициент усиления тока



4. ИТУН – источник тока, управляемый напряжением: а) нелинейный, б) линейный, S – крутизна (передаточная проводимость)



Контрольные вопросы:

1. Элементом электрической цепи называют
2. Пассивные элементы электрических цепей
3. Индуктивным элемент
4. Источник тока

Тема 2. Ионные приборы и приборы для отображения информации

Ионные приборы и приборы для отображения информации

Ионными (или газоразрядными) приборами называют электровакуумные приборы, электропроводность которых обусловлена электронами и ионами при электрическом разряде в газовой среде. Баллоны этих приборов наполняют инертными газами, водородом или парами ртути.

Конструкция и назначение ионных приборов весьма разнообразны. По конструкции ионные приборы во многом напоминают электронные лампы. В корпусе (баллоне), заполненном газом, помещаются электроды, число которых зависит от назначения и вида ионного прибора. Однако, как и в электронной лампе, основными электродами являются анод и катод, конструкция которых так же, как и в электронной лампе, зависит от типа прибора и его назначения. В соответствии с этим условное графическое обозначение ионных приборов напоминает обозначение электронных ламп с небольшим отличием в графическом обозначении электродов.

Иные приборы применяются в качестве выпрямителей для выпрямления переменного тока (игнитроны, тиратроны, ртутные вентили), стабилизаторов напряжения (стабилитроны), коммутаторов в слаботочных цепях, защитных элементов от перенапряжений и грозовых разрядов (разрядники), индикаторов (газоразрядные индикаторы) и др.

Как правило, газ в этих приборах находится под низким давлением. Электрический разряд в газе — это совокупность явлений, сопровождающих прохождение электрического тока через газ (или пар). При таком разряде происходит несколько основных процессов: возбуждение атомов, ионизация атомов и рекомбинация электронов.

Возбуждение атомов. Если в какой-либо газовой среде имеются свободные электроны, то они при своем движении неизбежно сталкиваются с атомами или молекулами газа. В результате этих столкновений может быть нарушена устойчивость системы атома или молекулы. Возможно несколько случаев нарушения устойчивости таких систем, из которых наиболее характерными являются возбуждение и ионизация атома. При возбуждении атома под ударами электрона один или несколько электронов атома переходят на более удаленную от ядра орбиту, т.е. на более высокий энергетический уровень, не нарушая электронейтральности атома. Такое возбужденное состояние атома длится недолго, обычно 10^{-7} — 10^{-9} с, после чего электрон возвращается на свою нормальную орбиту и при этом отдает в виде излучения энергию, которую атом получил при возбуждении от ударившего его электрона. Излучение сопровождается свечением газа, если испускаемые лучи относятся к видимой части электромагнитного спектра.

Для того чтобы произошло возбуждение атома, ударяющий электрон должен иметь определенную энергию, так называемую энергию возбуждения, например за счет напряжения возбуждения U_d .

Ионизация атома (или молекул) газа происходит при энергии ударяющего электрона больше той энергии, которой достаточно для возбуждения. Если ударяющий электрон обладает достаточным запасом кинетической энергии, то может произойти отрыв электрона и вместо нейтрального атома образуется положительный ион и свободный электрон. При соударении с нейтральным атомом электрона, имеющего малую кинетическую энергию, может произойти сцепление электрона с нейтральным атомом. В этом случае будет образован отрицательный ион. Вероятность образования отрицательных ионов зависит не только от скорости ударяющего электрона, но и от природы газа.

Рекомбинация. Наряду с ионизацией в газе происходит и обратный процесс нейтрализации — воссоединение ионов и электронов в нейтральные атомы. Положительные ионы и электроны совершают в газе беспорядочное (тепловое) движение и, приближаясь друг к другу, могут соединяться, образуя нейтральный атом. Этому способствует взаимное притяжение между разноименно заряженными частицами. Восстановление нейтральных атомов называется рекомбинацией. Полученный в результате рекомбинации нейтральный атом может снова ионизироваться, а затем его составные части — положительный ион и электрон — опять рекомбинироваться и т.д.

Поскольку на ионизацию затрачивается энергия, то положительный ион и электрон, получившиеся после ионизации, имеют в сумме энергию большую, чем нейтральный атом. Поэтому рекомбинация сопровождается выделением лучистой энергии. Обычно при этом наблюдается свечение газа.

В зависимости от степени ионизации газа, приложенного напряжения и тока, протекающего через него, различают следующие виды разрядов: темный (тихий), тлеющий, дуговой, искровой, высокочастотный, коронный.

Если разряд поддерживается внешним ионизатором (например, термоэлектронная эмиссия накаливаемого катода, лучи света, радиоактивное излучение и т.д.), то разряд называют несамостоятельным. Если разряд существует без воздействия первоначального ионизатора, то такой разряд называют самостоятельным.

Ионные приборы, в зависимости от типа катода, вида разряда, конструкции, способа управления разрядом, силы испускания тока, классифицируются по следующим признакам:

По типу катода:

— с холодным катодом — разряд поддерживается без затрат энергии внешнего источника на ионизацию и относится к приборам с самостоятельным разрядом (в данных газоразрядных приборах не затрачивается энергия на разогрев катода);

— с подогретым катодом — разряд (ионизация) поддерживается за счет подогрева катода, конструктивно выполненного, как и в электронной лампе с подогретым катодом и относящийся к приборам с несамостоятельным разрядом.

По способу управления разрядом (конструкции):

— неуправляемые — содержат 2 электрода;

— управляемые — содержат 3 и более электродов.

По виду разряда:

— темный (или тихий) разряд — несамостоятельный разряд характеризуется начальной ионизацией газовой среды при незаметном свечении;

— дуговой разряд — газоразрядные приборы с подогретым катодом (газотроны тиратроны и др.) имеют накаливаемый катод и наполняются инертным газом или парами ртути при давлении порядка десятых долей гПа; газоразрядные приборы с холодным катодом имеют жидкометаллический катод (ртутные выпрямители, экстроны и др.) либо самонакаливаемый катод (аркотроны);

— тлеющий разряд — газоразрядные приборы с холодным катодом при давлении газа несколько десятков гПа (стабилитроны, тиратроны и т.д.);

— искровой разряд — газоразрядные приборы с одинаковыми по конструкции холодными электродами при давлении газа внутри болона порядка сотен паскалей (искровые разрядники).

— коронный разряд — газоразрядные приборы с сильной неоднородностью электрического поля, разряд возникает лишь в области, примыкающей к аноду, при давлении газа внутри болона порядка сотен гПа (стабилитроны и др.).

Различные виды газового разряда можно проследить, изучая работу ионного прибора — его вольт-амперную зависимость, т.е. по вольт-амперной характеристике в двухэлектродном приборе с холодным катодом по схеме, показанной на рис. 7.48.

Если к электродам приложить небольшое напряжение U_a (несколько вольт), то через прибор потечет ток, обусловленный начальной ионизацией (космическими лучами, радиоактивным фоном Земли и т.д. — участок ОА).

С увеличением напряжения U_a ток возрастает и достигает насыщения (участок АБ). При дальнейшем увеличении напряжения U_a происходит увеличение кинетической энергии электронов. Происходит ударная ионизация атомов газа электронами, ток увеличивается (участок БВ). В этом случае происходит газовый разряд, который называется «тихим», несамостоятельным, разрядом. Данный разряд применяется в газонаполненных фотоэлементах для умножения тока начальной ионизации, создаваемого за счет фотоэлектронной эмиссии катода. Свечение газа незаметно. Этот вид разряда предшествует другим видам разряда.

При дальнейшем увеличении тока положительные ионы из-за меньшей подвижности скапливаются в междуэлектродном промежутке и изменяют распределение потенциала между электродами и электрическое поле так, что почти все падение напряжения в приборе оказывается сосредоточенным вблизи катода. Положительные

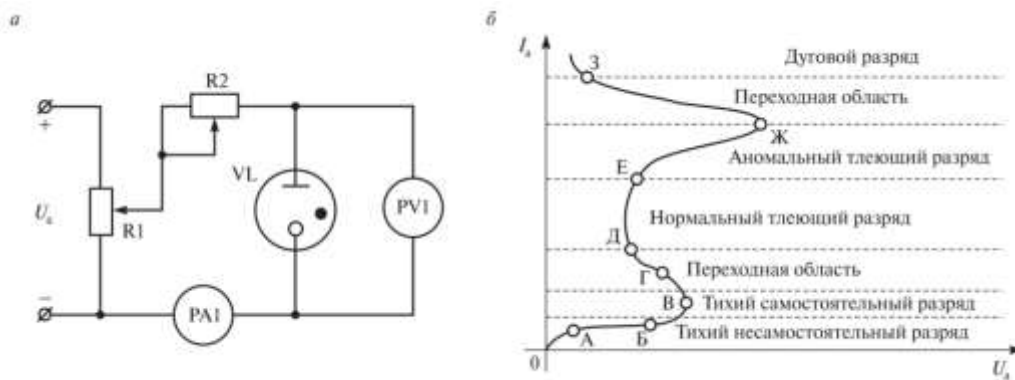


Рис. 7.48. Исследование газового разряда:

a — схема для снятия вольт-амперной характеристики газоразрядного прибора; *б* — вольт-амперная характеристика

газового разряда ионы, ускоряемые полем у катода, приобретают энергию, достаточную для выбивания электронов из катода.

Когда число ионов, попадающих на катод, и их энергии оказываются достаточными для того, чтобы вновь выбитые ими из катода электроны могли поддерживать разряд без участия внешнего ионизатора, устанавливается самостоятельный разряд. Характер самостоятельного разряда зависит от ограничительного резистора в схеме (R) и конструкции электродов. При большом сопротивлении R (около 1 МОм) и малой площади поверхности электрода возникает тихий самостоятельный разряд (участок ВГ) или его разновидность — коронный разряд.

Коронный разряд является самостоятельным и происходит в газовой среде с высоким давлением (порядка атмосферного и выше) и возле электродов с малой поверхностью (заостренные) электроды. Повышение тока и напряжения переводит коронный разряд в тлеющий или искровой разряд.

Если $R = 10\text{—}100$ кОм, участок ВГ отсутствует (тихий самостоятельный разряд не возникает), и сразу устанавливается нормальный тлеющий разряд (участок ДЕ). Тогда напряжение на приборе составляет 60—150 В при токах от единиц до десятков миллиампер. Переходная область (участок ГД) — это переходной процесс от тихого разряда к тлеющему, когда происходит нарастание объемного заряда возле катода.

Тлеющий разряд получил название по характеру свечения — только вблизи поверхности катода. Цвет свечения зависит от рода выбранного газа. Катодное тлеющее свечение используется в цифровых и знаковых индикаторах.

Характерной особенностью коронного и нормального тлеющего разрядов является постоянство падения напряжения на приборе при увеличении силы тока. Это свойство разрядов используется в опорных стабилитронах для стабилизации напряжения.

С увеличением напряжения сила тока увеличивается и свечение покрывает всю поверхность катода. В этом случае увеличение тока становится возможным только за счет увеличения энергии ионов. Поэтому падение напряжения в приборе начинает возрастать. Такой разряд называется аномальным тлеющим разрядом (участок ЕЖ). Этот вид разряда используется в газосветных лампах, применяемых в качестве модуляторов света. Изменяя подводимое напряжение или разрядный ток через лампу как управляющий сигнал, можно изменять яркость свечения. На этом принципе основано применение неоновых ламп в фототелеграфии, при записи звука в кино и т.п.

Дальнейшее повышение тока за счет уменьшения R или увеличения U_a может привести к тому, что после точки Ж аномальный тлеющий разряд скачком перейдет в самостоятельный дуговой разряд.

Самостоятельный дуговой разряд характеризуется большими токами (до сотен ампер) и малыми падениями напряжения на приборе (10—30 В). Эмиссия электронов с катода при дуговом разряде происходит за счет создания вблизи катода сильного электрического поля, образованного ионами газа. Такой вид эмиссии называется автоэлектронной эмиссией и возникает, если материал катода легко испаряется при нагреве (ртутные выпрямители, где катодом служит жидкая ртуть).

Эмиссия электронов с катода при дуговом разряде может возникнуть и за счет разогрева катода, тогда она называется термоэлектронной эмиссией.

В ионных приборах с накаливаемым катодом (т.е. существует искусственный внешний ионизирующий фактор в виде нагретого катода) возникает и несамостоятельный дуговой разряд. Применяется такой разряд в тиратронах и газотронах.

Искровой разряд подобен дуговому и представляет собой кратковременный (импульсный) электрический разряд.

Рассмотренные процессы в газоразрядных (ионных) приборах позволяют сделать вывод о широком использовании этих приборов в различных электронных устройствах.

На железнодорожном транспорте в устройствах автоматики и телемеханики применяются газоразрядные приборы с самостоятельным тлеющим разрядом — стабилитроны, неоновые лампы, тиратроны, разрядники и т.д.

Контрольные вопросы:

1. Ионными (или газоразрядными) приборами называют
2. Рекомбинация
3. Ионны подразделяются по типу
4. Исследование газового разряда

Тема 3. Общие сведения о полупроводниках. Электронно-дырочный переход. Образование и свойство p-n перехода

1. Полупроводниковые материалы (германий, кремний) по своему удельному электрическому сопротивлению занимают место между проводниками и диэлектриками. Разная величина проводимости у металлов, полупроводников и диэлектриков обусловлена разной величиной энергии, которую надо затратить на то, чтобы освободить валентный электрон от связей с атомами, расположенными в узлах кристаллической решетки, причем проводимости полупроводников в значительной степени зависит от наличия примесей и температуры.

В полупроводниках присутствуют подвижные носители заряда двух типов: отрицательные электроны и положительные дырки.

Если валентный электрон разорвал ковалентную связь и стал свободным, то в том месте, где он находился, будет преобладать положительный заряд, равный по абсолютной величине заряду электрона. Эти вакантные места, появляющиеся в валентных связях, называются *дырками*. Процесс возникновения свободного электрона и дырки называется *генерацией*. Свободный электрон может занять дырку и вновь стать валентным. Процесс, приводящий к исчезновению свободного электрона и дырки, называется *рекомбинацией*.

Если в кристаллическую решетку 4-валентного кремния ввести примесь 5-валентного элемента (фосфора P, сурьмы Sb, мышьяка As), то четыре валентных электрона каждого примесного атома примут участие в образовании ковалентных связей с четырьмя соседними атомами кремния, а пятый валентный электрон окажется избыточным. Он слабо связан с атомом и легко превращается в свободный. При этом атом примеси превращается в положительный неподвижный ион. Увеличение концентрации свободных электронов увеличивает

вероятность рекомбинации, поэтому концентрация дырок уменьшается. При нормальной температуре практически все атомы примеси превращаются в положительные неподвижные ионы, а число свободных электронов значительно превышает число дырок. Основными носителями заряда в таких полупроводниках являются электроны, поэтому такой полупроводник называется **полупроводником л-типа** (электронного типа). Неосновными носителями заряда в нем являются дырки. Примеси, атомы которых отдают электроны, называются донорами.

При введении примеси 3-валентного элемента (бора В, индия In, алюминия Al) три валентных электрона каждого атома примеси принимают участие в образовании только трех ковалентных связей, а для четвертой связи атом примеси забирает электрон из какой-либо другой связи между атомами кремния, образуя при этом дырку. Атом примеси превращается в отрицательный неподвижный ион. Таким образом, 3-валентная примесь увеличивает концентрацию дырок, что в свою очередь уменьшает концентрацию электронов. Основными носителями заряда таких полупроводников являются дырки, поэтому полупроводник называется **полупроводником р-типа** (дырочного типа). Неосновными носителями заряда являются электроны. Примеси, отбирающие электроны, называются акцепторами.

Чтобы примесная проводимость преобладала над собственной, концентрация атомов примеси N должна превышать концентрацию электронов n_i и дырок p_i в собственном полупроводнике ($n=p$). Практически всегда N гораздо больше n_i и p_i .

Концентрация неосновных носителей уменьшается во столько раз, во сколько раз увеличивается концентрация основных носителей. Это объясняется увеличением вероятности рекомбинации. Для примесного полупроводника справедливо равенство

$$np = n_i p_i = n_i^2 = p_i^2,$$

где n , p - концентрация электронов и дырок в примесном полупроводнике.

Концентрация основных носителей определяется концентрацией примеси и практически не зависит от температуры, так как уже при комнатной температуре все атомы примеси ионизированы, а число основных носителей, возникающих за счет генерации пар электрон-дырка, пренебрежимо мало по сравнению с общим числом основных носителей. В то же время концентрация неосновных носителей мала и сильно зависит от температуры, увеличиваясь в 2—3 раза при увеличении температуры на каждые 10°C.

2. Полупроводниковым диодом называется электропреобразовательный полупроводниковый прибор с одним выпрямляющим электрическим переходом, имеющий два вывода.

Структура полупроводникового диода с электронно-дырочным переходом и его условное графическое обозначение приведены на рис. 1.1, а, б.



Рисунок 1.1 – Структура п/п. диода.

Буквами p и n обозначены слои полупроводника с проводимостями соответственно p -типа и n -типа.

Обычно концентрации основных носителей заряда (дырочек в слое p и электронов в слое n , сильно различаются. Слой полупроводника, имеющий большую концентрацию, называют *эмиттером*, а имеющий меньшую концентрацию, - *базой*.

Далее рассмотрим основные элементы диода (p - n -переход и невыпрямляющий контакт металл-полупроводник), физические явления, лежащие в основе работы диода, а также важные понятия, используемые для описания диода. Глубокое понимание физических явлений и владение указанными понятиями необходимо не только для того, чтобы правильно выбирать конкретные типы диодов, но и для того, чтобы определять режимы работы соответствующих схем при выполнении традиционных расчетов по той или иной методике. В связи с быстрым внедрением в практику инженерной работы современных систем схемотехнического моделирования эти явления и понятия приходится постоянно иметь в виду при выполнении математического моделирования. Системы моделирования быстро совершенствуются, и математические модели элементов электронных схем все более оперативно учитывают самые «тонкие» физические явления. Это делает весьма желательным постоянное углубление знаний в описываемой области и необходимым – понимание основных физических явлений, а также правильное использование основных понятий.

3. Структура p - n -перехода

Вначале рассмотрим изолированные друг от друга слои полупроводника (рис. 1.2). Пары электрон-дырка, возникшие в результате термогенерации

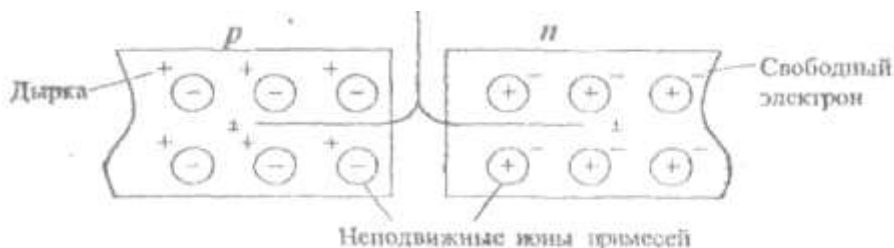


Рисунок 1.2 – Изолированные друг от друга слои полупроводника.

Изобразим соответствующие зонные диаграммы (рис. 1.3).



Рисунок 1.3 – Диаграмма изолированных слоёв.

Уровни зонных диаграмм и разности этих уровней часто характеризуют потенциалами и разностями потенциалов, измеряя их в вольтах (В), например, указывают, что ширина запрещенной зоны $\gamma_{д}$ для кремния равна 1,11 В.

Теперь рассмотрим контактирующие слои полупроводника (рис. 1.4),

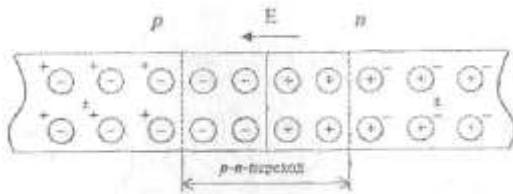


Рисунок 1.4 – Контактующие слои полупроводника.

В контактирующих слоях полупроводника имеет место диффузия дырок из слоя *p* в слой *n*, причиной которой является их значительно большая концентрация в слое *p*. Аналогичная причина обеспечивает диффузию электронов из слоя *n* в слой *p*. Диффузия дырок из слоя *p* в слой *n*, во-первых, уменьшает их концентрацию в приграничной области слоя *p* и, во-вторых, уменьшает концентрацию свободных электронов в приграничной области слоя *n* вследствие рекомбинации. К аналогичным результатам приводит и диффузия электронов из слоя *n* в слой *p*.

В итоге в приграничных областях слоя *p* и слоя *n* возникает обедненный слой, в котором мала концентрация подвижных носителей заряда (электронов и дырок). Обедненный слой имеет большое удельное сопротивление. Ионы примесей обедненного слоя не компенсированы дырками или электронами. В совокупности ионы образуют нескомпенсированные объемные заряды, создающие электрическое поле с напряженностью \mathcal{E} (см. рис. 1.4). Это поле препятствует переходу дырок из слоя *p* в слой *n* и переходу электронов из слоя *n* в слой *p*. Оно создает дрейфовый поток подвижных неосновных носителей заряда: дырок из слоя *n* в слой *p* и электронов из слоя *p* в слой *n*. В установившемся режиме дрейфовый поток равен диффузионному. В несимметричном *p-n*-переходе более протяженным является заряд в слое с меньшей концентрацией примеси, т. е. в базе.

Изобразим зонную диаграмму для контактирующих слоев (рис. 1.5), учитывая, что уровень Ферми для них является единым.



Рисунок 1.5 - Структура *p-n* - перехода и изучение зонной диаграммы.

Рассмотрение структуры *p-n* - перехода и изучение зонной диаграммы (см. рис. 1.5) показывают, что в области перехода возникает потенциальный барьер.

Контрольные вопросы:

1. Что такое p - проводимость и n - проводимость?
2. Что такое единая область?
3. Что такое потенциальный барьер?

Тема 4. Общие сведения о полупроводниках. Электронно-дырочный переход. Образование и свойство p - n перехода

В большинстве полупроводниковых приборов используются кристаллы комбинированного полупроводника с двумя и более слоями (зонами), образованными примесными полупроводниками с различным типом проводимости, т. е. полупроводниками p и n - типа. *Область комбинированного полупроводника, расположенная вблизи металлургической границы, разделяющей полупроводник на две части с разнотипной проводимостью (p и n - зоны), называется электронно - дырочным переходом или $p - n$ - переходом.*

Электронно-дырочный переход (рис. 7) обычно получают вплавлением или диффузией соответствующих примесей в пластинку монокристалла чистого полупроводника. Электронно-дырочный переход представляет собой очень тонкий (не более десятых долей микрометра) слой, разделяющий p и n – полупроводники (p и n – зоны) и в отличие от примесных или чистых полупроводников обладающий свойством *односторонней проводимости*, на использовании которой основана работа полупроводниковых приборов.

Образование электронно-дырочного перехода обусловлено различием концентраций подвижных носителей заряда в электронной и дырочной областях (зонах) комбинированного $p - n$ – полупроводника. В отсутствие внешнего электрического поля в зоне контакта полупроводников p и n – типа из-за разности концентраций подвижных носителей заряда в p и n - зонах происходит процесс диффузии основных носителей электрических заряда из зоны с повышенной концентрацией носителей в зону с пониженной концентрацией носителей заряда (*диффузионный ток $I_{диф}$*), т. е. дырки, концентрация которых повышена в полупроводнике p – типа, диффундируют в n - зону, а электроны, концентрация которых повышена в полупроводнике n – типа - диффундируют в p – зону. При встречном движении положительных (дырок) и отрицательных (электронов) носителей зарядов они взаимно нейтрализуются (рекомбинируют) и вблизи границы раздела полупроводников p и n – типа возникает область, обеднённая подвижными основными носителями заряда и обладающая высоким электрическим сопротивлением (*запирающий слой*).

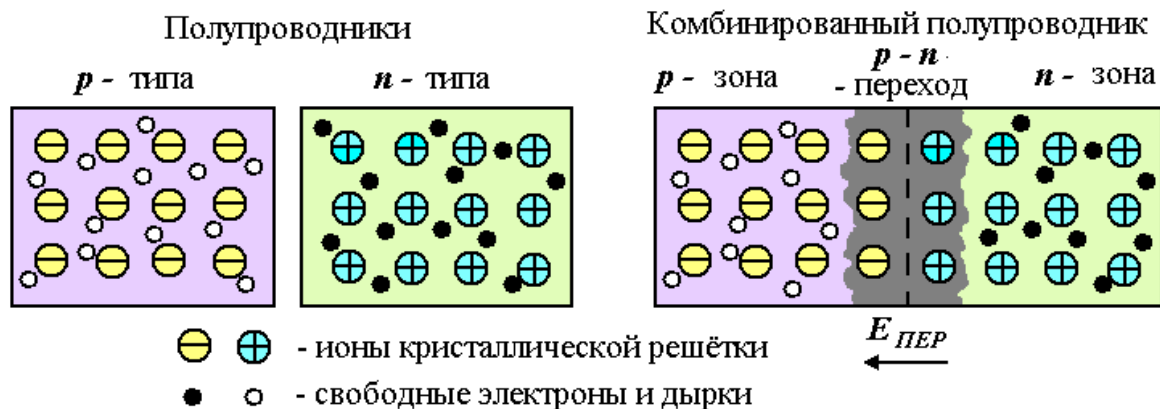


Рис. 7. Структура электронно-дырочного перехода

Если бы электроны и дырки были нейтральными, то в процессе диффузии произошло бы в конечном итоге полное выравнивание их концентраций по всему объему кристалла. Однако в действительности этого не происходит, поскольку диффузионный ток через p и n - переход приводит к нарушению баланса положительных и отрицательных зарядов и возникновению в запирающем слое электрического поля, препятствующего диффузии носителей зарядов. Уход электронов из n - зоны полупроводника приводит к тому, что их концентрация вблизи p и n - перехода уменьшается и здесь возникает не скомпенсированный положительный заряд неподвижных ионов донорной примеси. В другой части полупроводника - в p - зоне - вследствие ухода дырок их концентрация вблизи p и n - перехода снижается и здесь возникает не скомпенсированный отрицательный заряд неподвижных ионов кристаллической решётки.

Таким образом, в результате диффузии носителей заряда в запирающем слое нарушается баланс положительных и отрицательных зарядов и на границе раздела полупроводников p и n - типа возникают два слоя противоположных по знаку зарядов, образованных неподвижными ионами кристаллической решётки: отрицательными в p - зоне, в положительными в n - зоне, т. е. возникает так называемый **двойной электрический слой**.

Этот двойной электрический слой (контактная разность потенциалов), образованный пространственными зарядами ионов кристаллической решётки, создает внутри запирающего слоя электрическое поле напряженностью $E_{ПЕР}$ (**поле перехода** или **потенциальный барьер**), направленное от n - зоны полупроводника к p - зоне, т. е. направленное навстречу диффузионному току. Под действием поля перехода возникает встречное движение неосновных носителей заряда через p - n - переход - дырок из n - зоны и электронов - из p - зоны, т. е. возникает так называемый **дрейфовый ток $I_{др}$** , направленный навстречу диффузионному току.

Разделение носителей заряда на диффундирующие и дрейфующие довольно условно, т.к. в действительности каждый носитель заряда в запирающем слое находится в движении под одновременным действием сил диффузии и внутреннего электрического поля перехода. Через некоторое время дрейфовый ток полностью компенсирует диффузионный и в области p - n - перехода наступает динамическое равновесие, когда результирующий ток через переход равен нулю

$$I = I_{диф} - I_{др} = 0.$$

Такой режим соответствует равновесному состоянию p - n - перехода при отсутствии внешнего электрического поля.

Контрольные вопросы:

1. Что такое p - проводимость и n - проводимость?

2. Что такое единая область?
3. Что такое потенциальный барьер?

Тема 5. Выпрямительные, туннельные полупроводниковые диоды. Стабилитроны.

1. Стабилитрон - это полупроводниковый диод, сконструированный для работы в режиме электрического пробоя. Условное графическое обозначение стабилитрона представлено на рис. 1.39,а.

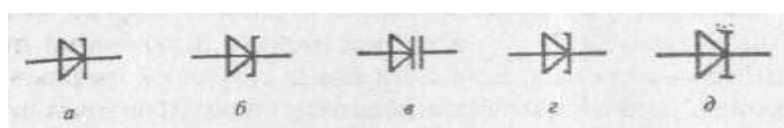


Рис. 1.39

В указанном режиме при значительном изменении тока стабилитрона напряжение изменяется незначительно. Говорят, что стабилитрон стабилизирует напряжение. Изобразим для примера вольт-амперные характеристики кремниевого стабилитрона Д814Д (рис. 1.40).

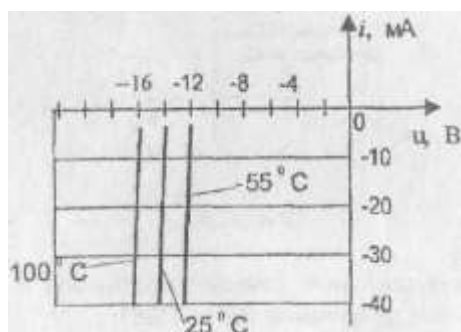
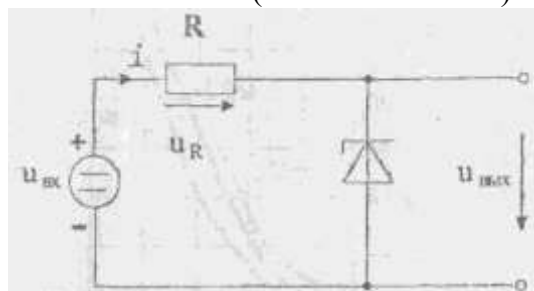


Рис. 1.40

В стабилитронах может иметь место и туннельный, и лавинный, и смешанный пробой в зависимости от удельного сопротивления базы. В стабилитронах с низкоомной базой (низковольтных, до 5,7 В) имеет место туннельный пробой, а в стабилитронах с высокоомной базой (высоковольтных) - лавинный пробой.



Для примера применения стабилитрона обратимся к схеме параметрического стабилизатора напряжения (рис. 1.41). Если напряжение U_T настолько велико, что

стабилитрон находится в режиме пробоя, то изменения этого напряжения практически не вызывают изменения напряжения $u_{\text{вых}}$ (при изменении напряжения $u_{\text{вх}}$ изменяется только ток/, а также напряжение $u_R: u_R = i \cdot R$).

Рис. 1.41

Стабилитрон является быстродействующим прибором и хорошо работает в импульсных схемах.

2. Варикап. Это полупроводниковый диод, предназначенный для работы в качестве конденсатора, емкость которого управляется напряжением. Условное графическое обозначение варикапа представлено на рис. 1.39,8.

На варикап подают обратное напряжение. Барьерная емкость варикапа уменьшается при увеличении (по модулю) обратного напряжения. Характер изменения емкости у варикапа такой же, как и у обычного диода.

3. Туннельный диод. Это полупроводниковый диод, в котором используется явление туннельного пробоя при включении в прямом направлении. Характерной особенностью туннельного диода является наличие на прямой ветви вольт-амперной характеристики участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Условное графическое обозначение туннельного диода представлено на рис. 1.39,г.

Для примера изобразим (рис. 1.43) прямую ветвь вольт-амперной характеристики германиевого туннельного усилительного диода 1И104А, предназначенного для усиления в диапазоне волн 2-10 см (это соответствует частоте более 1ГГц).

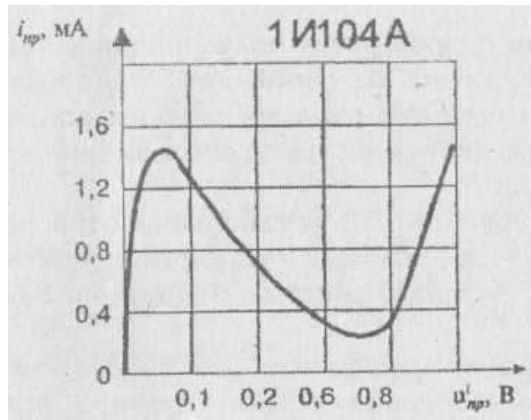


Рис. 1.43

Наличие участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением на вольт-амперной характеристике обеспечивает возможность использования туннельных диодов в качестве усилительного элемента и в качестве основного элемента генераторов. В настоящее время туннельные диоды используются именно в этом качестве в области сверхвысоких частот.

4. Обращенный диод. Это полупроводниковый диод, физические явления в котором подобны физическим явлениям в туннельном диоде, поэтому зачастую обращенный диод рассматривают как вариант туннельного диода. При этом участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением на вольт-амперной характеристике обращенного диода отсутствует или очень слабо выражен.

Обратная ветвь вольт-амперной характеристики обращенного диода (отличающаяся очень малым падением напряжения) используется в качестве прямой ветви "обычного" диода, а прямая ветвь - в качестве обратной ветви. Отсюда и название - обращенный диод.

5. Стабистор. Это полупроводниковый диод, напряжение на котором при прямом включении (около 0,7 В) мало зависит от тока (прямая ветвь на соответствующем участке почти вертикальная). Стабистор предназначен для стабилизации малых напряжений.

6. Диод Шоттки. В диоде Шоттки используется не р-л-переход, а выпрямляющий контакт металл-полупроводник. Условное графическое обозначение диода Шоттки представлено на рис. 1.39,6. При работе диода Шоттки отсутствуют инжекция неосновных носителей и соответствующие явления накопления и рассасывания, поэтому диоды Шоттки – очень быстродействующие приборы, они могут работать на частотах до десятков гигагерц. У диода Шоттки может быть малый обратный ток и малое прямое напряжение (при малых прямых токах) - около 0,5 В, что меньше, чем у кремниевых приборов. Максимально допустимый прямой ток может составлять десятки и сотни ампер, а максимально допустимое напряжение - сотни вольт.

Для примера изобразим прямые ветви вольт-амперных характеристик (рис. 1.42) кремниевого диода КД923А с барьером Шоттки (диода Шоттки), предназначенного для работы в импульсных устройствах.

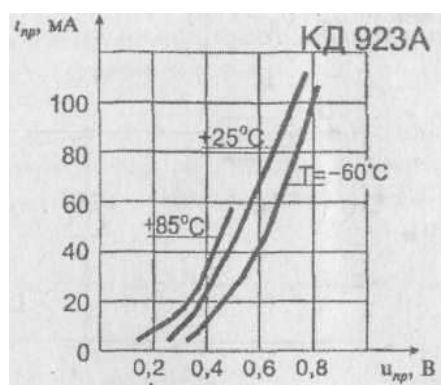


Рис. 1.42

Контрольные вопросы:

1. В каком режиме работает стабилитрон?
2. Почему диод Шоттки может работать на сверхвысоких частотах?

Какая характерная особенность ВАХ туннельного диода позволяет работать основным элементом в усилителях и генераторах?

Тема 6. Устройство и принцип действия транзисторов и схемы включения транзисторов (ОБ, ОЭ, ОК)

1. Биполярный транзистор - это полупроводниковый прибор с двумя р-п-переходами, имеющий три вывода. Действие биполярного транзистора основано на использовании носителей заряда обоих знаков (дырок и электронов), а управление протекающим через него током осуществляется с помощью управляющего тока. Биполярный транзистор является наиболее распространенным активным полупроводниковым прибором.

2. Устройство транзистора. Биполярный транзистор в своей основе содержит три слоя полупроводника (р-п-р или п-р-п) и соответственно два р-п-перехода. Каждый слой полупроводника через невыпрямляющий контакт металл-полупроводник подсоединен к внешнему выводу.

Средний слой и соответствующий вывод называют базой, один из крайних слоев и соответствующий вывод называют эмиттером, а другой крайний слой и соответствующий вывод - коллектором.

Дадим схематическое, упрощенное изображение структуры транзистора типа п-р-п (рис. 1.45,а) и два допустимых варианта условного графического обозначения (рис. 1.45,б).

Транзистор типа р-п-р устроен аналогично, упрощенное изображение его структуры дано на рис. 1.46,а, более простой вариант условного графического обозначения - на рис. 1.46,б.

Рисунок 10.1 – Структурная схема нелинейной САУ.

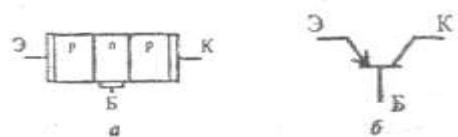
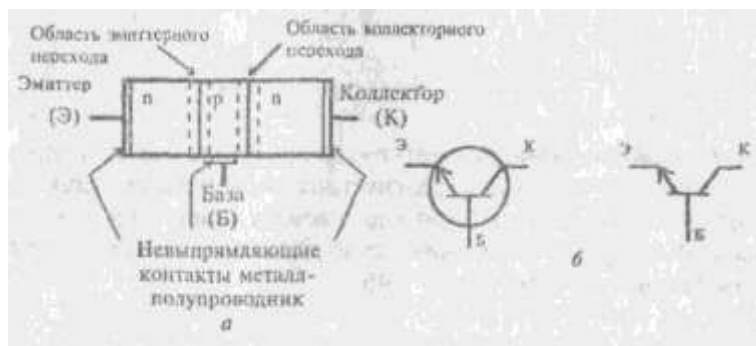


Рис. 1.46

Транзисторы типа п-р-п более распространены в сравнении с транзисторами типа р-п-р, так как обычно имеют лучшие параметры. Это объясняется следующим образом: основную роль в электрических процессах в транзисторах типа п-р-п играют электроны, а в транзисторах типа р-п-р - дырки. Электроны же обладают подвижностью в два-три раза большей, чем дырки.

Реально площадь коллекторного перехода значительно больше площади эмиттерного перехода, так как такая несимметрия значительно улучшает свойства транзистора.

Для определенности обратимся к транзистору типа п-р-п. Основными элементами транзистора являются два соединенных р-п-перехода. Это позволяет дать формальное представление структуры транзистора, представленное на рис. 1.47.



Рис. 1.47

Для понимания принципа работы транзистора исключительно важно' учитывать, что р-п-переходы транзистора сильно взаимодействуют. Это означает, что ток одного перехода сильно влияет на ток другого, и наоборот. Именно это взаимодействие радикально отличает транзистор от схемы с двумя диодами (рис. 1.48).

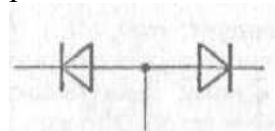


Рис. 1.48

В схеме с диодами ток каждого диода зависит только от напряжения на нем самом и никак не зависит от тока другого диода.

Указанное взаимодействие имеет простую причину: очень малое расстояние между переходами транзистора (от 20—30 мкм до 1 мкм и менее). Это расстояние называют толщиной базы. Именно эта количественная особенность структуры создает качественное своеобразие транзистора..

3. Основные физические процессы. Концентрация атомов примеси (и свободных электронов) в эмиттере сравнительно велика, поэтому этот слой низкоомный. Концентрация атомов примеси (и дырок) в базе сравнительно низка, поэтому этот слой высокоомный. Концентрация атомов примеси (и свободных электронов) в коллекторе может быть как больше концентрации атомов примеси в базе, так и меньше ее.

С помощью источников напряжения сместим эмиттерный переход в прямом, а коллекторный - в обратном направлении (рис. 1.49). Тогда через эмиттерный переход потечет ток $i_{\text{э}}$, который будет обеспечиваться главным образом инжекцией электронов из эмиттера в базу. Инжекция дырок из базы в эмиттер будет незначительной вследствие указанного выше различия в концентрациях атомов примесей.

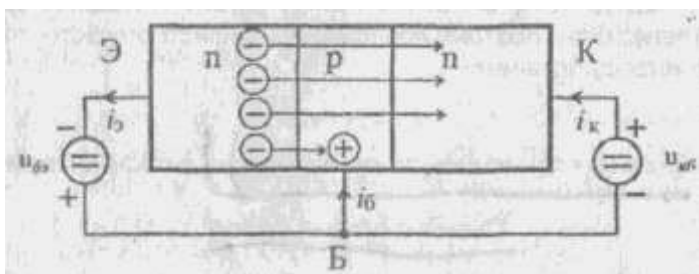


Рис. 1.49

Из-за малой толщины базы почти все электроны, пройдя базу, достигают коллектора. Только малая доля электронов рекомбинирует в базе с дырками. Убыль этих дырок компенсируется протеканием тока

базы i_b . Из изложенного следует, что $i_b \ll i_e$.

Обратное; смещение коллекторного перехода способствует тому, что электроны, подошедшие к нему, захватываются электрическим полем перехода и переносятся в коллектор. В то же время это поле препятствует переходу электронов из коллектора в базу.

Ток коллектора i_c лишь незначительно меньше тока эмиттера. Более точно:

$$i_c = \alpha_{em} \cdot i_e + I_{ко}$$

где α_{em} - статический коэффициент передачи эмиттерного тока (термин статический подчеркивает тот факт, что этот коэффициент связывает постоянные токи);

$I_{ко}$ - обратный ток коллектора.

Природа обратного тока коллектора такая же, как и у обратного тока диода (т. е. тока диода, включенного в обратном направлении). Ток $I_{ко}$ протекает и тогда, когда ток эмиттера равен нулю.

Различают диффузионные (бездрейфовые) и дрейфовые транзисторы. В диффузионных транзисторах концентрация атомов примесей в базе примерно одинакова во всех ее частях, поэтому ионы атомов примесей не создают в базе дополнительное электрическое поле, которое влияло бы на движение носителей электричества через базу. При этом движение этих носителей проходит главным образом в форме диффузии. В дрейфовых транзисторах указанная концентрация различна в различных точках базы. Это приводит к появлению дополнительного электрического поля, которое оказывает существенное влияние на движение носителей через базу (говорят, что носители дрейфуют под действием этого поля). Дрейф ускоряет движение носителей через базу, поэтому дрейфовые транзисторы часто отличаются высоким быстродействием.

4. Схемы включения транзистора]и) их характеристики Схема с общей базой

Схема включения транзистора в электрическую цепь, изображенная на рис. 1.50, называется схемой с общей базой, так как база является общим электродом для источников напряжения.

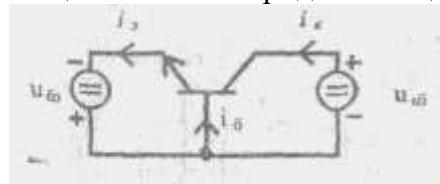


Рис. 1.50

Транзисторы традиционно характеризуются их входными и выходными характеристиками. Для схемы с общей базой входной характеристикой называют зависимость тока i_e от напряжения $U_{бэ}$ при заданном напряжении $U_{кб}$, т. е. зависимость вида

$$i_{\text{э}} = f(u_{\text{бэ}})_{u_{\text{кб}} = \text{const}}$$

где f ~ некоторая функция.

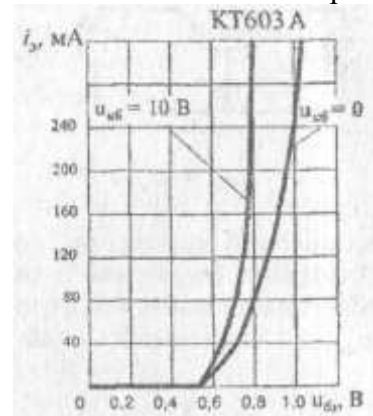
Входной характеристикой называют и график соответствующей зависимости (это справедливо и для других характеристик).

Выходной характеристикой для схемы с общей базой называют зависимость тока $i_{\text{к}}$ от напряжения $u_{\text{кб}}$ при заданном токе $i_{\text{э}}$, т. е. зависимость вида

$$i_{\text{к}} = f(u_{\text{кб}})_{i_{\text{э}} = \text{const}}$$

где f - некоторая функция.

Входные характеристики для схемы с общей базой. Каждая входная характеристика в значительной степени определяется характеристикой эмиттерного перехода и поэтому аналогична характеристике диода. Изобразим входные характеристики кремниевого транзистора КТ603А (максимальный постоянный ток коллектора - 300 мА, максимальное постоянное напряжение коллектор-база - 30 В при $t < 70^\circ \text{C}$) (рис. 1.51). Сдвиг характеристик влево при увеличении напряжения $u_{\text{кб}}$ объясняется проявлением



эффекта Эрли (эффекта модуляции толщины базы).

Рис. 1.51

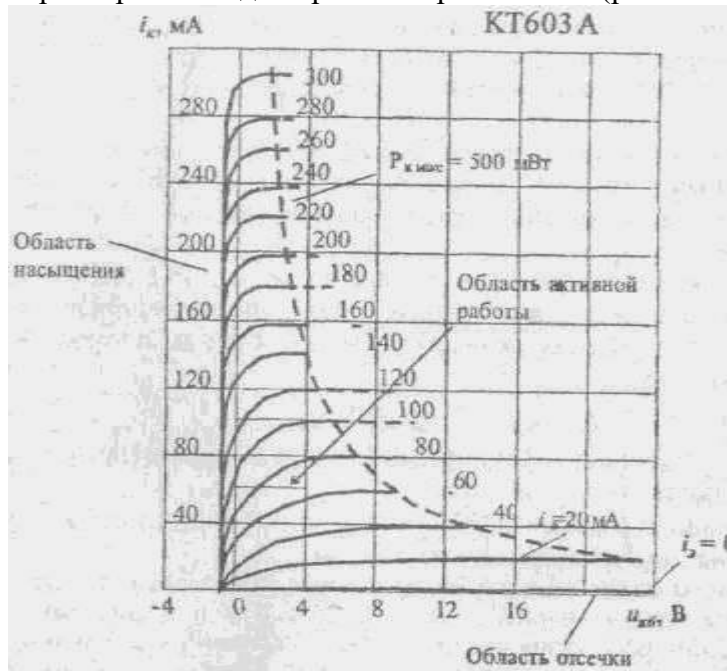
Указанный эффект состоит в том, что при увеличении напряжения $u_{\text{кб}}$ коллекторный переход расширяется (как и всякий обратнo смещенный p-n-переход). Если концентрация атомов примеси в базе меньше концентрации атомов примеси в коллекторе, то расширение коллекторного перехода осуществляется в основном за счет базы, в любом случае толщина базы уменьшается. Уменьшение толщины базы и соответствующее уменьшение ее сопротивления приводят к тому, что при неизменном токе $i_{\text{э}}$ напряжение $u_{\text{бэ}}$ уменьшается. Как было отмечено при рассмотрении диода, при малом по модулю обратном напряжении на p-n-переходе это напряжение влияет на ширину перехода больше, чем при большом напряжении. Поэтому различные входные характеристики, соответствующие различным напряжениям $u_{\text{кб}}$, независимо от типа транзистора практически сливаются, если $u_{\text{кб}} > 5 \text{ В}$ (или даже если $u_{\text{кб}} > 2 \text{ В}$).

Входные характеристики часто характеризуются дифференциальным сопротивлением r , определяемым аналогично дифференциальному сопротивлению диода.

Теперь

$$r_{\text{диф}} = \frac{dU_{\text{бэ}}}{di_2} \Big|_{i_2 = \text{заданный}} \Big|_{U_{\text{кб}} = \text{const}}$$

Выходные характеристики для схемы с общей базой Изобразим выходные характеристики для транзистора КТ603А (рис. 1.52).



Как уже отмечалось, если коллекторный переход смещен в обратном направлении ($U_{\text{кб}} > 0$), то ток коллектора примерно равен току эмиттера. Это соотношение сохраняется даже при $U_{\text{кб}} = 0$ (если ток эмиттера достаточно велик), так как и в этом случае большинство электронов, инжектированных в базу, захватывается электрическим полем коллекторного перехода и переносится в коллектор.

Только если коллекторный переход смещают в прямом направлении ($U_{\text{кб}} < 0$), ток коллектора становится равным нулю, так как при этом начинается инжекция электронов из коллектора в базу (или дырок из базы в коллектор). Эта инжекция компенсирует переход из базы в коллектор тех электронов, которые были инжектированы эмиттером. Ток коллектора становится равным нулю при выполнении условия $|U_{\text{кб}}| < 0,75$ В.

Режим, соответствующий первому квадранту характеристик ($U_{\text{кб}} > 0$, $i_э > 0$, причем ток эмиттера достаточно велик), называют активным режимом работы транзистора. На координатной плоскости ему соответствует область активной работы.

Режим, соответствующий второму квадранту ($U_{\text{кб}} < 0$), называют режимом насыщения. Ему соответствует область насыщения.

При увеличении температуры ток $I_{\text{к0}}$ возрастает (для КТ603 $I_{\text{ш}} = 100$ мкА при $t < 85^\circ\text{C}$) и все выходные характеристики несколько смещаются вверх.

Режим работы транзистора, соответствующий токам коллектора, сравнимым с током $I_{к0}$, называют режимом отсечки. Соответствующую область характеристик вблизи оси напряжений называют областью отсечки.

В активном режиме напряжение $u_{кб}$ и мощность $P_K = I_K \cdot u_{кб}$, выделяющаяся в виде тепла в коллекторном переходе, могут быть значительны. Чтобы транзистор не перегрелся, должно выполняться, неравенство

$$P_K \leq P_{K \text{ макс.}}$$

где $P_{K \text{ макс.}}$ - максимально допустимая мощность (для КТ603А $P_{K \text{ макс.}} = 500$ мВт при $T_K = 50^\circ\text{C}$).

График зависимости $i = P_{\text{гагр}}/u$ (гипербола) изображен на выходных характеристиках пунктиром.

Таким образом, в активном режиме эмиттерный переход смещен в прямом направлении, а коллекторный - в обратном. В режиме насыщения оба перехода смещены в прямом направлении, в режиме отсечки коллекторный переход смещен в обратном направлении, а эмиттерный или смещен в обратном направлении, или находится под очень малым прямым напряжением.

$$\alpha = \left. \frac{di_K}{di_E} \right|_{I_K = \text{заданный}, u_{кб} = \text{const}}$$

Для приращения тока коллектора ΔI_K и приращения тока эмиттера ΔI_E можно записать:

$$\Delta I_K = \alpha \cdot \Delta I_E$$

Транзистор часто характеризуют дифференциальным коэффициентом

передачи эмиттерного тока α , который определяется выражением

Коэффициент α несколько изменяется при изменении режима работы транзистора. Важно учитывать, что у различных (вполне годных) экземпляров транзистора одного и того же типа коэффициент α может заметно отличаться. Для транзистора КТ603А при $t = 25^\circ\text{C}$ $\alpha = 0,909 \dots 0,988$.

Наличие наклона выходных характеристик, отражающее факт увеличения тока коллектора при заданном токе эмиттера, при увеличении напряжения $u_{кб}$, объясняется проявлением эффекта Эрли: при уменьшении толщины базы все большее количество электронов, инжектированных эмиттером, переходит в коллектор.

Наклон выходных характеристик численно определяют дифференциальным сопротивлением коллекторного перехода

$$r_K = \left. \frac{du_{кб}}{di_K} \right|_{I_E = \text{заданное}, I_B = \text{const}}$$

С учетом эффекта Эрли

$$I_K = \alpha_{\text{эф}} \cdot I_E + I_{к0} + \frac{1}{r_K} \cdot u_{кб}$$

Схема с общим эмиттером

Значительно чаще, чем схема с общей базой, применяется схема, представленная на рис. 1.53. Ее называют схемой с общим эмиттером, так как эмиттер является общим электродом для источников напряжения.

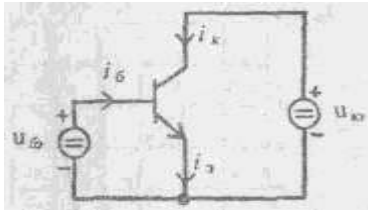


Рис. 1,53

Для этой схемы входной характеристикой называют зависимость тока $i_{\text{б}}$ от напряжения $u_{\text{б}}$ при заданном напряжении $u_{\text{к}}$, т. е. зависимость вида

$$i_{\text{б}} = f(u_{\text{б}}) \Big|_{u_{\text{к}} = \text{const}}$$

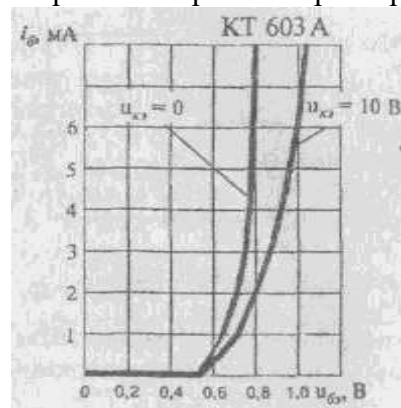
где f - некоторая функция. Выходной характеристикой называют зависимость тока $i_{\text{к}}$ от напряжения $u_{\text{б}}$ при заданном токе $i_{\text{б}}$, т. е. зависимость вида

$$i_{\text{к}} = f(u_{\text{б}}) \Big|_{i_{\text{б}} = \text{const}}$$

где f - некоторая функция. Очень важно уяснить следующие два факта.

1. Характеристики для схемы с общим эмиттером не отражают никакие новые физические эффекты по сравнению с характеристиками для схемы с общей базой и не несут никакой принципиально новой информации о свойствах транзистора. Для объяснения особенностей характеристик с общим эмиттером не нужна никакая информация, кроме той, что необходима для объяснения особенностей характеристик схемы с общей базой. Тем не менее характеристики для схемы с общим эмиттером очень широко используют на практике (и приводят в справочниках), так как ими удобно пользоваться.
2. При расчетах на компьютерах моделирующие программы вообще никак не учитывают то, по какой схеме включен транзистор. Программы используют математические модели транзисторов, являющиеся едиными для всевозможных схем включения. Однако очень полезно уметь определить тип схемы включения транзистора. Это облегчает понимание принципа работы схемы.

Входные характеристики для схемы с общим эмиттером. Изобразим характеристики уже



рассмотренного транзистора КТ603А (рис. 1.54).

Рис. 1.54

Теперь эффект Эрли проявляется в том, что при увеличении напряжения $U_{кэ}$ характеристики сдвигаются вправо. Дифференциальное сопротивление в этом случае определяется выражением

$$r_{диф} = \frac{du_{кэ}}{di_{кэ}} \Big|_{i_{б} = \text{const}}$$

Выходные характеристики для схемы с общим эмиттером. Изобразим эти характеристики для транзистора КТ603А (рис. 1.55).

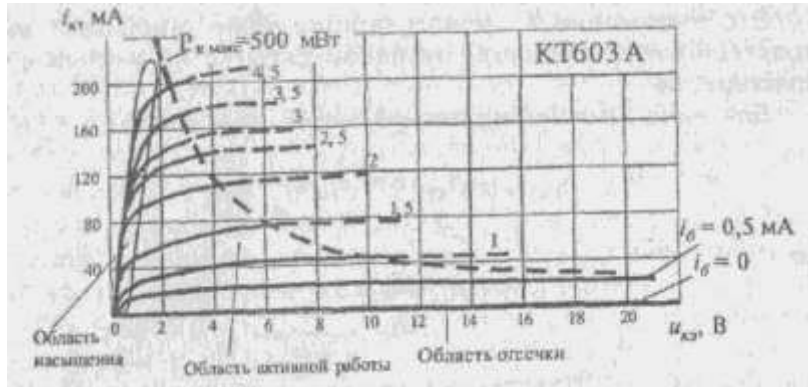


Рис. 1.55 полученному выражению

$$i_{кэ} = \alpha_{ст} \cdot i_{б} + I_{кэ0}$$

Обратимся к ранее

$$i_{б} = i_{кэ} + i_{бэ}$$

В соответствии с первым

$$i_{кэ} = \alpha_{ст} \cdot (i_{кэ} + i_{бэ}) + I_{кэ0}$$

и с учетом предыдущего

откуда

$$i_{кэ} = \frac{\alpha_{ст}}{1 - \alpha_{ст}} \cdot i_{бэ} + \frac{1}{1 - \alpha_{ст}} \cdot I_{кэ0}$$

Введем обозначение:

$$\beta_{ст} \equiv \frac{\alpha_{ст}}{1 - \alpha_{ст}}$$

Коэффициент $\beta_{ст}$ называют статическим коэффициентом передачи базового тока. Его величина обычно составляет десятки или сотни (это безразмерный коэффициент).

Легко заметить, что

$$\frac{1}{1 - \alpha_{ст}} = \beta_{ст} + 1$$

Введем обозначение $I_{кэ0} = (\beta_{ст} + 1) \cdot I_{кб0}$

В итоге получаем $i_{кэ} = \beta_{ст} \cdot i_{бэ} + I_{кэ0}$

Это выражение в первом приближении описывает выходные характеристики в области активной работы, не учитывая наклона характеристик.

$$i_{кэ} = \beta_{ст} \cdot i_{бэ} + I_{кэ0} + \frac{1}{r_{кэ}} \cdot U_{кэ}$$

Для учета наклона выражение записывают в виде

$$r_k = \left. \frac{du_{кз}}{di_k} \right|_{u_{кз} = \text{заданный}, u_{эб} = \text{const}}$$

где

В первом приближении $\beta'_k = (1/\beta + P_{CT}) \cdot \beta_k$ (сопротивление r определено выше). Часто пользуются дифференциальным коэффициентом передачи базового тока (3).

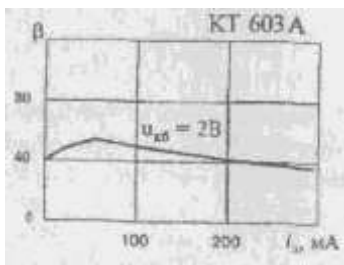
$$\beta = \left. \frac{di_k}{di_b} \right|_{i_k = \text{заданный}, u_{кз} = \text{const}}$$

Для приращения тока коллектора Δi_k и тока базы Δi_b можно записать:

$$\Delta i_k = \beta \cdot \Delta i_b$$

По определению

Для транзистора КТ603А при $t=25^\circ\text{C}$ $P=10..80$. Величина β зависит от режима работы транзистора. Приведем типичный график зависимости β от тока эмиттера (он практически равен току коллектора) для $u_{кб}=2\text{В}$ (рис. 1.56).



Инверсное включение транзистора

{^A}У У

Иногда транзистор работает в таком режиме, что коллекторный переход смещен в прямом направлении, а эмиттерный - в обратном. При этом коллектор играет роль эмиттера, а эмиттер - роль коллектора. Это инверсный режим. Ему соответствует инверсный коэффициент передачи базового тока P_r . Из-за отмеченных выше несимметрии структуры транзистора и различия в концентрациях примесей в слоях полупроводника обычно $P_r \ll P$. Часто $P_r \sim 1$.

Изобразим выходные характеристики для схемы с общим эмиттером и для прямого, и для инверсного включения (рис. 1.57).

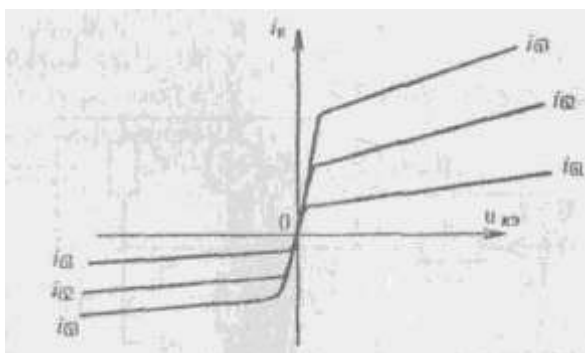


Рис. 1.57 1.2.3. Эквивалентная схема транзистора (^P d^-

Упрощенные математические модели принято называть эквивалентными схемами.

Рассмотрим эквивалентную схему, которую можно использовать только при прямом (не инверсном) включении в режиме активной работы и в режиме отсечки (в режиме насыщения ее использовать нельзя), и в случае, когда амплитуда переменной составляющей тока коллектора, а также амплитуда переменной составляющей напряжения $u_{кэ}$ невелики. При выполнении этих условий в первом приближении выходные и входные характеристики транзистора можно считать линейными. Переходя к идеализированным входным (рис. 1.58) и выходным (рис. 1.59) характеристикам транзистора, которые показаны пунктирными линиями, получим эквивалентную схему транзистора, представленную на рис. 1.60

Контрольные вопросы:

1. Почему транзистор называется биполярным?
2. Что значит включение транзистора с ОБ, ОЭ, ОК?
3. определите входные и выходные характеристики для всех схем включения?
3. Какой режим работы транзистора называют активным, режимом насыщения, режимом отсечки.
4. определите h -параметры для всех схем включения?

Тема 7. Система обозначений полупроводниковых приборов

При использовании полупроводниковых приборов в электронных устройствах для унификации их обозначения и стандартизации параметров используются системы условных обозначений. Эта система классифицирует полупроводниковые приборы по их назначению, основным физическим и электрическим параметрам, конструктивно-технологическим свойствам, виду полупроводниковых материалов. Система условных обозначений отечественных полупроводниковых приборов базируется на государственных и отраслевых стандартах. Первый ГОСТ на систему обозначений полупроводниковых приборов ГОСТ 10862-64 был введен в 1964 году. Затем по мере возникновения новых классификационных групп приборов был изменен на ГОСТ 10862-72, а затем на отраслевой стандарт ОСТ 11.336.038-77 и ОСТ 11.336.919-81 соответственно в 1972, 1977, 1981 годах. При этой модификации основные элементы буквенно-цифрового кода системы условных обозначений сохранились. Эта система обозначений логически построена и позволяет наращивать себя по мере дальнейшего развития элементной базы [23 – 25, 29, 36 – 38].

Основные термины, определения и буквенные обозначения основных и справочных параметров полупроводниковых приборов приведены в следующих гостах:

- **25529-82**– Диоды полупроводниковые. Термины, определения и буквенные обозначения параметров;
- **19095-73**– Транзисторы полевые. Термины, определения и буквенные обозначения параметров;
- **20003-74**– Транзисторы биполярные. Термины, определения и буквенные обозначения параметров;

- **20332-84**– Тиристоры. Термины, определения и буквенные обозначения параметров.

9.1. Условные обозначения и классификация отечественных полупроводниковых приборов

Рассмотрим на примере ОСТ 11.336.919-81 «Приборы полупроводниковые. Система условных обозначений» систему обозначений полупроводниковых приборов, которая состоит из 5 элементов. В основу системы обозначения положен буквенно-цифровой код.

Первый элемент. Первый элемент (буква или цифра) обозначает исходный полупроводниковый материал, на базе которого создан полупроводниковый прибор. Для приборов общегражданского применения используются 4 буквы Г, К, А и И, являющиеся начальными буквами в названии полупроводника или полупроводникового соединения. Для приборов специального применения (более высокие требования при испытаниях, например выше температура,) вместо этих букв используются цифры от 1 до 4. В таблице 6 приведены обозначения для первого элемента.

Таблица 6

Исходный материал	Условные обозначения
Германий или его соединения	Г или 1
Кремний или его соединения	К или 2
Соединения галлия (например, арсенид галлия)	А или 3
Соединения индия (например, фосфид индия)	И или 4

Второй элемент. Второй элемент (буква) обозначает подкласс полупроводниковых приборов. Обычно буква выбирается из названия прибора, как первая буква названия (табл. 7)

Таблица 7

Подкласс приборов	Условные обозначения	Подкласс приборов	Условные обозначения
Выпрямительные, универсальные, импульсные диоды	Д	Стабилитроны	С
Транзисторы биполярные	Т	Выпрямительные столбы	Ц
Транзисторы полевые	П	Диоды Ганна	Б

Варикапы	В	Стабилизаторы тока	К
Тиристоры диодные	Н	Сверхвысокочастотные диоды	А
Тиристоры триодные	У	Излучающие оптоэлектронные приборы	Л
Туннельные диоды	И	Оптопары	О

Третий элемент. Третий элемент (цифра) в обозначении полупроводниковых приборов, определяет основные функциональные возможности прибора. У различных подклассов приборов наиболее характерные эксплуатационные параметры (функциональные возможности) различные. Для транзисторов – это рабочая частота и рассеиваемая мощность, для выпрямительных диодов – максимальное значение прямого тока, для стабилизаторов – напряжение стабилизации и рассеиваемая мощность, для тиристоров – значение тока в открытом состоянии. В таблице 8 приведены значения цифр в третьем элементе условных обозначений для различного класса полупроводниковых приборов.

Таблица 8

Назначение прибора	Условные обозначения	Назначение прибора	Условные обозначения
Диоды выпрямительные, с прямым током, А:		Выпрямительные столбы с прямым током, А:	
<i>менее 0,3</i>	1	<i>менее 0,3</i>	1
<i>0,3...10</i>	2	<i>0,3 ... 10</i>	2
Диоды прочие (магнитодиоды, термодиоды и др.)	3	Выпрямительные блоки с прямым током, А:	
Диоды импульсные, с временем восстановления, нс:		<i>менее 0,3</i>	3
<i>более 500</i>	4	<i>0,3...10</i>	4
<i>150...500</i>	5	Транзисторы биполярные:	
<i>30...150</i>	6	<i>маломощные с рассеиваемой мощностью $P_x < 0,3$ Вт:</i>	
<i>5...30</i>	7	<i>низкой частоты (граничная частота $F_{гр} < 3$ МГц)</i>	1

<i>1...5</i>	8	<i>средней частоты ($F_{гр}=3...30$ МГц)</i>	2
<i>с эффективным временем жизни неосновных носителей заряда менее 1 нс</i>	9	<i>высокой и сверхвысокой частот</i>	3
<i>Триодные тиристоры с максимально допустимым средним током в открытом состоянии (или импульсным), А:</i>		<i>средней мощности ($P_x=0,3...1,5$ Вт):</i>	

Продолжение таблицы 8

<i>незапираемые:</i>		<i>низкой частоты</i>	4
<i>менее 0,3 (менее 15)</i>	1	<i>средней частоты</i>	5
<i>0,3...10 (15...100)</i>	2	<i>высокой и сверхвысокой частот</i>	6
<i>более 10 (более 100)</i>	7	<i>большой мощности ($P_x > 1,5$ Вт):</i>	
<i>запираемые:</i>		<i>низкой частоты</i>	7
<i>менее 0,3 (менее 15)</i>	3	<i>средней частоты</i>	8
<i>0,3...10 (15...100)</i>	4	<i>высокой и сверхвысокой частот</i>	9
<i>более 10 (более 100)</i>	6	<i>Транзисторы полевые:</i>	
<i>симметричные:</i>		<i>малой мощности ($P_x < 0,3$ Вт):</i>	
<i>менее 0,3 (менее 15)</i>	5	<i>низкой частоты</i>	1
<i>0,3 ... 10 (15 ... 100)</i>	6	<i>средней частоты</i>	2
<i>более 10 (более 100)</i>	9	<i>высокой и сверхвысокой частот</i>	3
<i>Туннельные диоды:</i>		<i>средней мощности ($P_x=0,3...1,5$ Вт):</i>	
<i>обращенные</i>	1	<i>низкой частоты</i>	4
<i>генераторные</i>	2	<i>средней частоты</i>	5

усилительные	3	высокой и сверхвысокой частот	6
переключательные	4	большой мощности ($P_x > 1,5 \text{ Вт}$):	
Генераторы шума:		низкой частоты	7

Окончание таблицы 8

Низкочастотные	1	средней частоты	8
высокочастотные	2	высокой и сверхвысокой частот	9
Варикапы:		Источники инфракрасного излучения:	
подстрочные	1	излучающие диоды	1
умножительные (варакторы)	2	излучающие модули	2
Стабилитроны, стабилитроны и ограничители, с напряжением стабилизации, В:		Приборы визуального представления информации:	
мощностью менее 0,3 Вт:		светоизлучающие диоды	3
менее 10	1	знаковые индикаторы	4
10...100	2	знаковые табло	5
более 100	3	шкалы	6
мощностью 0,3...5 Вт:		экраны	7
менее 10	4	Оптопары:	
10...100	5	резисторные	Р
более 100	6	диодные	Д
мощностью 5...10 Вт		тиристорные	У
менее 10	7	транзисторные	Т
10...100	8		
более 100	9		

Четвертый элемент. Четвертый элемент (2 либо 3 цифры) означает порядковый номер технологической разработки и изменяется от 01 до 999.

Пятый элемент. Пятый элемент (буква) в буквенно-цифровом коде системы условных обозначений указывает разбраковку по отдельным параметрам приборов, изготовленных в единой технологии. Для обозначения используются заглавные буквы русского алфавита от А до Я, кроме З, О, Ч, Ё, Ш, Щ, Я, схожих по написанию с цифрами.

Контрольные вопросы:

1. Определения и буквенные обозначения основных и справочных параметров полупроводниковых приборов приведены в следующих гостах
2. Первый элемент (буква или цифра) обозначает
3. Второй элемент (буква или цифра) обозначает
4. Третий элемент (буква или цифра) обозначает

Раздел 2. Усилители. Общие сведения об усилителях

Тема 8. Усилительные каскады и многокаскадные усилители

1 Усилитель - это электронное устройство (четырёхполюсник), управляющее потоком энергии, идущей от источника питания к нагрузке.

2 Мощность, требующаяся для управления, как правило, намного меньше мощности, отдаваемой в нагрузку, а формы входного (усиливаемого) и выходного (на нагрузку) сигналов совпадают (рис. 1).

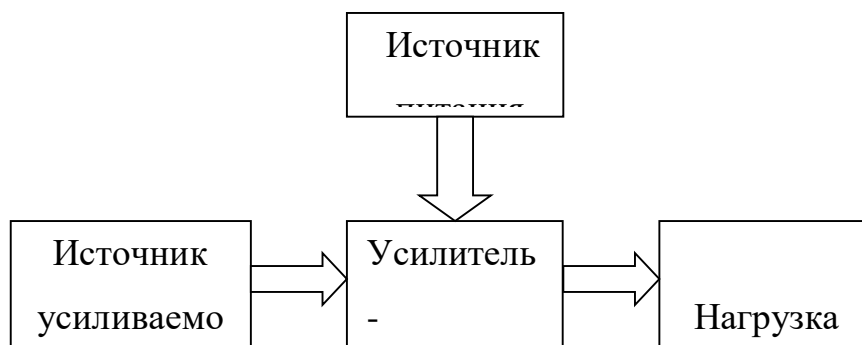


Рисунок 10.1. Схема подключения усилителя

Усилители используются для компенсации потерь при передаче информационных сигналов на большие расстояния, для обеспечения работы регистрирующих устройств, для создания нормальных условий восприятия информации человеком и т. д. Например, для обеспечения работы громкоговорителей мультимедиа-компьютера, как правило, требуется усилитель, так как поступающие от источников звуковые сигналы имеют недостаточную мощность.

По усиливаемой электрической величине различают *усилители мощности, напряжения и тока*. Коэффициент передачи усилителя по одному из указанных

электрических параметров, как правило, много больше единицы. По другим параметрам коэффициент передачи усилителя может быть меньше единицы. Однако у всех усилителей по определению коэффициент передачи по мощности должен быть больше единицы. Поэтому, например, повышающий трансформатор, у которого коэффициент передачи по напряжению может быть больше единицы, к усилителям не относится.

По диапазону усиливаемых частот усилители делятся на *усилители постоянного тока* (УПТ), *усилители низкой* (звуковой) *частоты* (УНЧ), *усилители высокой частоты* (УВЧ) и *СВЧ-усилители* (сверхвысокой частоты). В компьютерах, например, УПТ используются в источниках питания, УНЧ в звуковых платах, УВЧ и СВЧ-усилители - в приемниках радио- и телевизионных сигналов.

По используемым элементам различают усилители на транзисторах, микросхемах, электронных лампах и т.д. Ниже рассматриваются усилители только на транзисторах и микросхемах. Такие усилители широко используются в компьютерах.

По режимам работы различают *линейные и нелинейные усилители*. В линейных усилителях уровни входных и выходных сигналов малы, и поэтому все элементы усилителя при воздействии малых переменных: сигналов характеризуются линейной зависимостью между токами и приложенными напряжениями. Если амплитуда сигнала велика, то линейная зависимость между токами и напряжениями нарушается - возникает нелинейный режим работы усилителя.

Усилители классифицируют также по числу каскадов, по назначению, по полосе усиливаемых частот, по характеру усиливаемого сигнала и т. д.

3 Основные параметры и характеристики усилителей.

Основным количественным параметром усилителя является коэффициент усиления. В зависимости от функционального назначения усилителя различают коэффициенты усиления по напряжению K_u , току K_i или мощности K_p :

$$K_u = \frac{U_{вых}}{U_{вх}}, \quad K_i = \frac{I_{вых}}{I_{вх}}, \quad K_p = \frac{P_{вых}}{P_{вх}},$$

где $U_{вх}$, $I_{вх}$ – амплитудные значения напряжения и тока на входе усилителя;

$U_{вых}$, $I_{вых}$ – амплитудные значения переменных составляющих соответственно напряжения и тока на выходе;

$P_{вх}$, $P_{вых}$ – мощности соответственно на входе и выходе.

Коэффициенты усиления часто, выражают в логарифмических единицах - децибелах:

$$K_u(\text{дБ}) = 20 \lg K_u; \quad K_i(\text{дБ}) = 20 \lg K_i; \quad K_p(\text{дБ}) = 10 \lg K_p.$$

Усилитель может состоять из одного или нескольких каскадов.

Для многокаскадных усилителей коэффициент усиления равен произведению коэффициентов усиления отдельных его каскадов: $K = K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_n$. Если коэффициенты усиления каскадов выражены в децибелах, то общий коэффициент усиления равен сумме коэффициентов усиления отдельных каскадов:

$$K(\text{дБ}) = K_1(\text{дБ}) + K_2(\text{дБ}) + \dots + K_n(\text{дБ}).$$

Обычно в усилителе содержатся реактивные элементы, в том числе, и «паразитные», а используемые усилительные элементы обладают инерционностью. В силу этого коэффициент усиления является комплексной величиной:

$$\dot{K}_U = K_U \cdot e^{j\varphi},$$

где $Ku=U_{вых}/U_{вх}$ - модуль коэффициента усиления; φ -сдвиг фаз между входным и выходным напряжениями с амплитудами $U_{вх}$ и $U_{вых}$.

Помимо коэффициента усиления, важным количественным показателем является коэффициент полезного действия:

$$\eta = \frac{P_{вых}}{P_{вх}},$$

где $P_{ист}$ - мощность, потребляемая усилителем от источника питания.

Роль этого показателя особенно возрастает для мощных, как правило, выходных каскадов усилителя.

К количественным показателям усилителя относятся также входное $R_{вх}$ и выходное $R_{вых}$ сопротивления усилителя:

$$R_{вх} = \frac{U_{вх}}{I_{вх}}; \quad R_{вых} = \frac{|\Delta U_{вых}|}{|\Delta I_{вых}|};$$

где $\Delta U_{вых}$ и $\Delta I_{вых}$ - приращение амплитудных значений напряжения и тока на выходе усилителя.

Рассмотрим теперь основные характеристики усилителей.

Амплитудная характеристика усилителя - это зависимость амплитуды выходного напряжения (тока) от амплитуды входного напряжения (тока) (рис. 10.2).



Рисунок 10.2. Амплитудная характеристика усилителя

Точка 1 соответствует напряжению шумов, измеряемому при $U_{вх}=0$, точка 2- минимальному входному напряжению, при котором на выходе усилителя можно различать сигнал на фоне шумов. Участок 2-3 - это рабочий участок, на котором сохраняется пропорциональность между входным и выходным напряжениями усилителя. После точки 3 наблюдаются нелинейные искажения входного сигнала. Степень нелинейных искажений оценивается коэффициентом нелинейных искажений (или коэффициентом гармоник):

$$K_r = \frac{\sqrt{U_{2m}^2 + U_{3m}^2 + \dots + U_{nm}^2}}{U_{1m}},$$

где U_{1m} , U_{2m} , U_{3m} , U_{nm} – амплитуды 1-й (основной), 2-й, 3-й и n-й гармоник выходного напряжения соответственно.

Величина $D = U_{ex.max} / U_{ex.min}$ характеризует динамический диапазон усилителя.

Рассмотрим пример возникновения нелинейных искажений (рис.10.3).

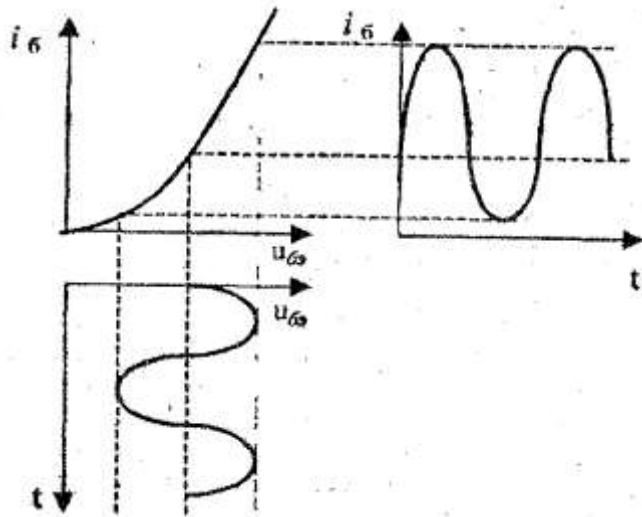


Рисунок 10.3. Возникновение нелинейных искажений

При подаче на базу транзистора относительно эмиттера напряжения синусоидальной формы $u_{вэ}$ в силу нелинейности входной характеристики транзистора $i_с = f(u_{вэ})$ входной ток транзистора $i_с$ (а следовательно, и выходной - ток коллектора) отличен от синусоиды, т. е. в нем появляется ряд высших гармоник. Из приведенного примера видно, что нелинейные искажения зависят от амплитуды входного сигнала и положения рабочей точки транзистора и не связаны с частотой входного сигнала, т. е. для уменьшения искажения формы выходного сигнала входной должен быть низкоуровневым. Поэтому в многокаскадных усилителях нелинейные искажения в основном появляются в оконечных каскадах, на вход которых поступают сигналы с большой амплитудой.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) усилителя - это зависимость модуля коэффициента усиления от частоты.

Типовая АЧХ приведена на рис. 10.4. Частоты f_n и f_v называются нижней и верхней граничными частотами, а их разность $(f_n - f_v)$ - полосой пропускания усилителя.

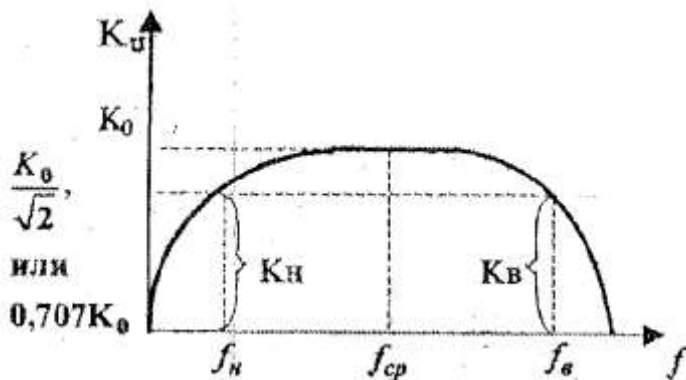


Рисунок 10.4. АЧХ усилителя

При усилении гармонического сигнала достаточно малой амплитуды искажения формы усиленного сигнала не возникает. При усилении сложного входного сигнала, содержащего ряд гармоник, эти гармоники усиливаются усилителем неодинаково, так как реактивные сопротивления схемы по-разному зависят от частоты, и в результате это приводит к искажению формы усиленного сигнала. Такие искажения называются частотными и характеризуются коэффициентом частотных искажений: $M = K_0 / K_1$, где K_1 - модуль коэффициента усиления усилителя на заданной частоте, K_0 - модуль коэффициента усиления усилителя на частоте среза.

Коэффициенты частотных искажений $M_H = K_0 / K_H$ и $M_B = K_0 / K_B$ называются соответственно коэффициентами искажений на нижней и верхней граничных частотах.

АЧХ может быть построена и в логарифмическом масштабе. В этом случае она называется ЛАЧХ (рис. 10.5), коэффициент усиления усилителя выражают в децибелах, а по оси абсцисс откладывают частоты через декаду (интервал частот между $10f$ и f). Обычно в качестве точек отсчета выбирают частоты, соответствующие $f = 10^n$. Кривые ЛАЧХ имеют в каждой частотной области определенный наклон. Его измеряют в децибелах на декаду.

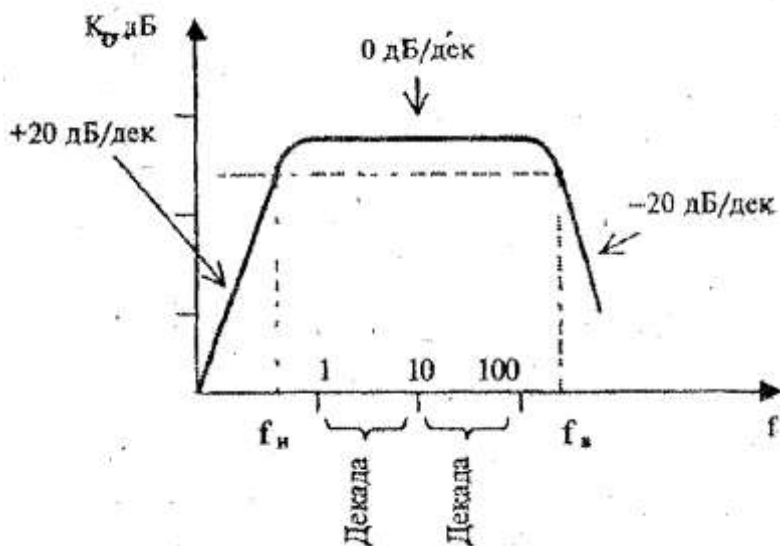


Рисунок 10.5. ЛАЧХ усилителя.

Фазо-частотная характеристика (ФЧХ) усилителя - это зависимость угла сдвига фаз между входным и выходным напряжениями от частоты.

Типовая ФЧХ приведена на рис. 10.6. Она также может быть построена в логарифмическом масштабе. В области средних частот дополнительные фазовые искажения минимальны. ФЧХ позволяет оценить фазовые искажения, возникающие в усилителях по тем же причинам, что и частотные.

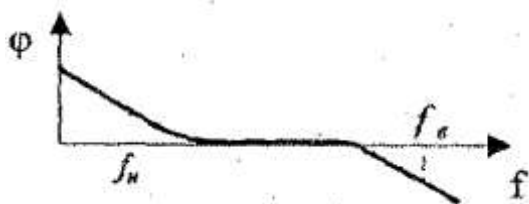


Рисунок 10.6. ФЧХ усилителя

Пример возникновения фазовых искажений приведен на рис. 10.7, где показано усиление входного сигнала, состоящего из двух гармоник (пунктир), которые при усилении претерпевают неодинаковые фазовые сдвиги.

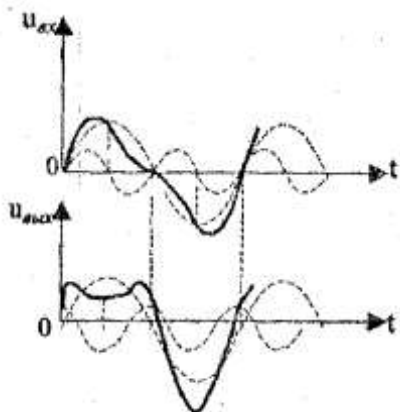


Рисунок 10.7. Возникновение фазовых искажений

Переходная характеристика усилителя - это зависимость выходного сигнала (тока, напряжения) от времени при скачкообразном входном воздействии (рис.10.8).

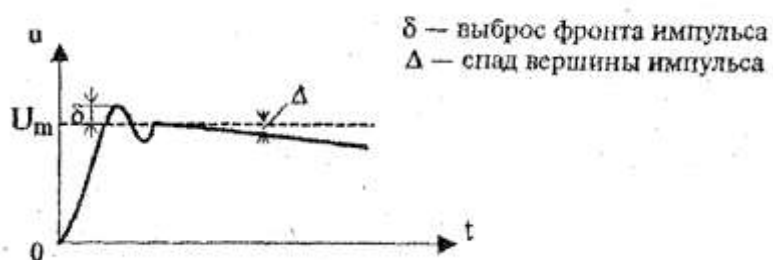


Рисунок 10.8. Переходная характеристика усилителя

Частотная, фазовая и переходная характеристики усилителя однозначно связаны друг с другом. Области верхних частот соответствует переходная характеристика в области малых значений времени, области нижних частот, - переходная характеристика в области больших значений времени.

Контрольные вопросы:

1. Что такое усилитель?
2. В чем заключается принцип усиления?
3. Что такое коэффициент усиления?
4. Что такое частотные характеристики?
5. Дайте определение полосе пропускания частот усилителя?

Тема 9. Построение усилительного каскада.

Многие усилители состоят из нескольких ступеней, осуществляющих последовательное усиление сигнала и называемых каскадами. Число каскадов в многокаскадных усилителях зависит от требуемых значений коэффициентов усиления. В зависимости от выполняемых функций, усилительные каскады подразделяются на каскады предварительного усиления и выходные каскады. Каскады предварительного усиления предназначены для повышения уровня сигнала по напряжению, а выходные каскады – для получения требуемых значений тока или мощности сигнала в нагрузке.

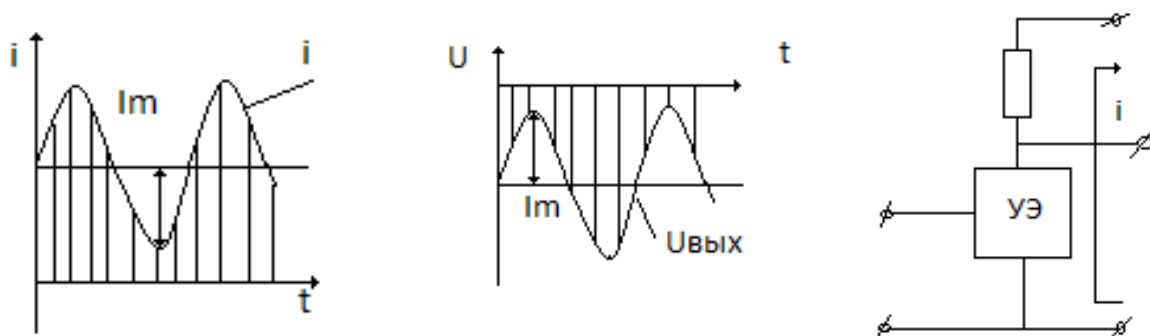


Рисунок 2.2

Рассмотрим принцип построения усилительного каскада на примере структурной схемы (рисунок 2.2), состоящей из управляемого элемента $УЭ$, функции которого выполняет биполярный или полевой транзистор и резистора R . Совместно с напряжением питания E эти элементы образуют выходную цепь каскада. Усиливаемый сигнал $U_{\text{вх}}$, принятый для простоты синусоидальным, подаётся на вход $УЭ$. Выходной сигнал снимается с выхода $УЭ$ или с резистора R . Он создаётся в результате изменения сопротивления $УЭ$ и, следовательно, тока в выходной цепи под воздействием входного напряжения. Процесс усиления основывается на преобразовании энергии источника постоянного напряжения E в энергию переменного напряжения в выходной цепи за счёт изменения сопротивления $УЭ$ по закону, задаваемому входным сигналом.

Ввиду использования для питания источника постоянного напряжения E , ток I в выходной цепи каскада является однонаправленным. При этом переменный ток и переменное напряжение выходной цепи, пропорциональные току и напряжению входного сигнала, следует рассматривать как переменные составляющие тока и напряжения, накрывающиеся на их постоянные составляющие I_n и U_n , причём обязательно, чтобы $I_n \geq I_m$, а $U_n \geq U_m$. Если эти условия выполняться не будут, то ток в выходной цепи на отдельных интервалах будет равен нулю, что приведёт к искажению формы выходного сигнала. Таким образом, для обеспечения работы усилительного каскада при переменном входном сигнале в его выходной цепи должны быть созданы постоянные составляющие тока I_n и напряжения U_n . Задачу решают путём подачи во входную цепь каскада помимо усиливаемого сигнала постоянного напряжения $U_{\text{вхп}}$ или создания постоянного входного тока $I_{\text{вхп}}$.

Постоянные составляющие тока и напряжения определяют режим покоя усилительного каскада. Параметры режима покоя по входной цепи ($I_{вхн}$, $U_{вхн}$) и по выходной цепи (I_n , U_n) характеризуют электрическое состояние схемы в отсутствии входного сигнала.

Усилительные свойства каскадов усиления основываются на следующем. При подаче на управляемый элемент напряжения входного сигнала в токе выходной цепи создаётся переменная составляющая, вследствие чего на управляемом элементе образуется аналогичная составляющая напряжения, превышающая переменную составляющую напряжения на входе.

Показатели усилительных каскадов зависят от способа включения транзистора, выполняющего роль управляемого элемента: с общим эмиттером, общим коллектором, общей базой.

Контрольные вопросы:

1. Принцип построения усилительного каскада
2. Показатели усилительных каскадов зависят от

Тема 10. Графический анализ усилительного каскада на примере схемы с общим эмиттером.

Графический анализ каскада с ОЭ сводится к построению по известным семействам статических входных и выходных характеристик транзистора и сопротивлению резистора R_k так называемой динамической проходной характеристики (ДПХ). ДПХ позволяет выбрать режим каскада по постоянному току (рабочую точку), а также оценить величину амплитуды входного сигнала для обеспечения линейного режима работы усилителя.

Динамическими проходными характеристиками являются зависимости выходного тока или выходного напряжения от входного напряжения. Для каскада с ОЭ это будут зависимости $i_k(u_{бэ})$ или $u_{кэ}(u_{бэ})$. Для построения ДПХ используется уравнение, связывающее выходной ток с сопротивлением R_k . Это уравнение называется линией нагрузки по постоянному току. Из схемы рис.1 видно, что в соответствии с законом Кирхгофа в выходной цепи имеет место соотношение

$$i_k = \frac{E_k - u_{кэ}}{R_k} \quad (1)$$

Это линейное уравнение тока i_k относительно напряжения $u_{кэ}$ может быть графически отражено на выходных характеристиках транзистора с ОЭ.

Точки пересечения семейства выходных ВАХ транзистора с линией нагрузки дают совокупность мгновенных значений выходных тока и напряжения в данном каскаде.

Рис.2 иллюстрирует графическое построение ДПХ каскада с ОЭ. Здесь на рис.2,а представлено семейство входных ВАХ транзистора с ОЭ, на рис.2,б - семейство выходных ВАХ и линия нагрузки (утолщенная линия), построенная в соответствии с уравнением (1).

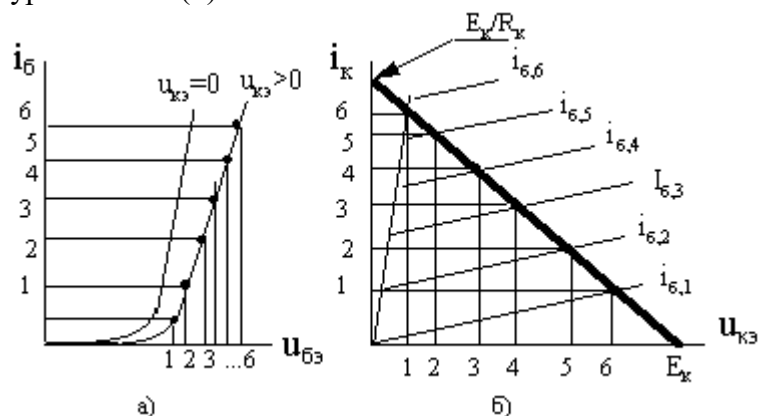


Рис.2

Состояние транзистора, определяемое точками пересечения ВАХ и линии нагрузки (ЛН), характеризуется конкретными значениями токов базы и коллектора, напряжений на промежутках база-эмиттер и коллектор-эмиттер. Для построения ДПХ удобно составить таблицу, в которой записываются координаты точек пересечения линии нагрузки и выходных ВАХ транзистора (см. табл. 1).

Таблица 2.1

N	1	2	3	4	5
$u_{кэ}$	$u_{кэ1}$	$u_{кэ2}$	$u_{кэ3}$	$u_{кэ4}$	$u_{кэ5}$
$i_к$	$i_{к1}$	$i_{к2}$	$i_{к3}$	$i_{к4}$	$i_{к5}$
$i_б$	$i_{б1}$	$i_{б2}$	$i_{б3}$	$i_{б4}$	$i_{б5}$
$u_{бэ}$	$u_{бэ1}$	$u_{бэ2}$	$u_{бэ3}$	$u_{бэ4}$	$u_{бэ5}$

Эта таблица позволяет построить однозначные зависимости, связывающие выходные переменные с входными, а именно: $i_к(u_{бэ})$ или $u_{кэ}(u_{бэ})$, которые и являются динамическими проходными характеристиками. На рис.3 показаны примеры ДПХ каскада с ОЭ.

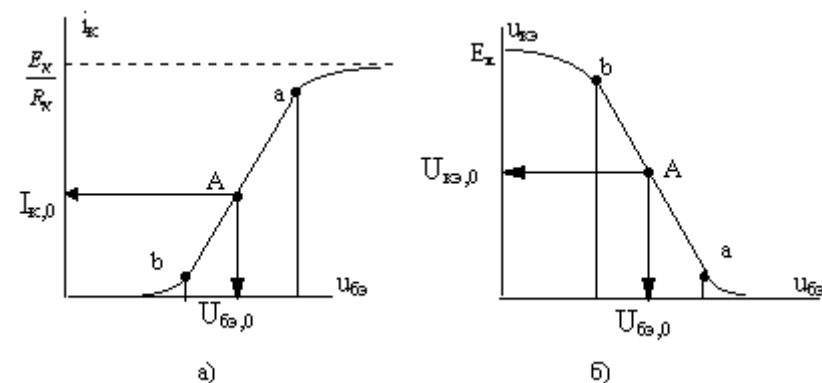


Рис.3

Для определения режима работы транзистора на участке ДПХ с наибольшей крутизной отмечается линейный участок (точки а, б), определяющий диапазон изменения входных

и выходных переменных, а середина этого линейного участка (точка А) определяет режим каскада по постоянному току - рабочую точку транзистора. Рабочая точка характеризуется значениями $I_{к,0}$, $U_{бэ,0}$ и соответствующими им $U_{кэ,0}$ и $I_{б,0}$. Величина $U_{бэ,0}$ обычно называется напряжением смещения и обозначается $E_{см}$. На рис.4 с помощью ДПХ показано преобразование гармонического входного сигнала в режиме линейного усиления.

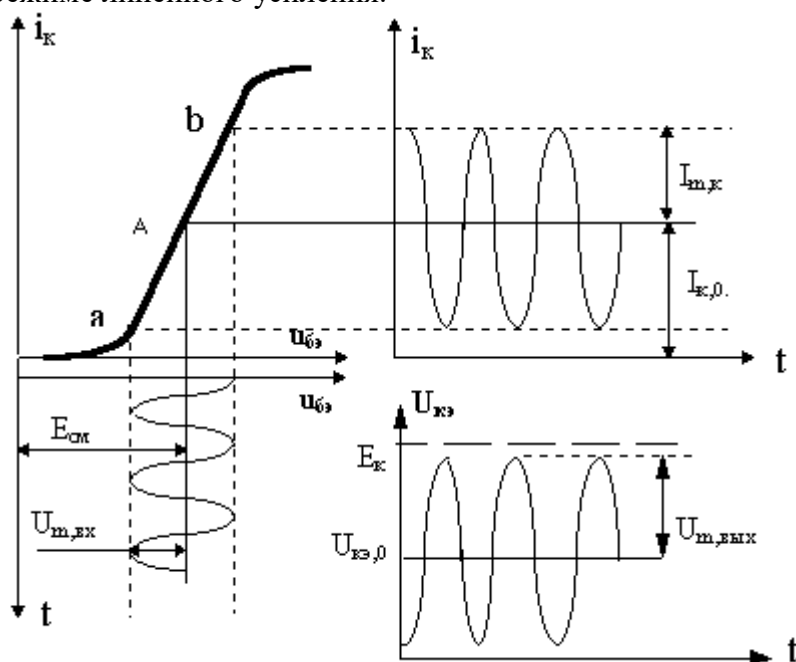


Рис.4

На линейном участке ДПХ амплитуда выходного тока $I_{м,к}$ пропорциональна наклону (крутизне S) линейного участка ДПХ и амплитуде входного сигнала $U_{м,бэ}$, то есть $I_{м,к} = S U_{м,бэ}$, а амплитуда изменения напряжения на резисторе $R_к$ равна $I_{м,к} R_к$.

Мгновенное напряжение на коллекторе равно

$$u_{кэ} = E_к - I_{м,к} R_к \cos(\omega t),$$

а выходное напряжение (после разделительного конденсатора) будет равно

$$u_{вых}(t) = - I_{м,к} R_к \cos(\omega t).$$

Следовательно, амплитуда выходного напряжения определяется как

$$U_{м,вых} = U_{м,вх} S R_к,$$

фаза же выходного напряжения отличается от фазы входного напряжения на 180° . Следовательно, коэффициент передачи по напряжению каскада, определенный из графического анализа, равен

$$K = - S R_к. \quad (2)$$

Графический анализ является ориентировочным для определения усилительных свойств каскада. Он не учитывает его частотных свойств, так как оперирует лишь со статическими характеристиками транзистора и линией нагрузки по постоянному току. Для более полного анализа усилительного каскада и определения его основных параметров и характеристик в режиме линейного усиления проводится анализ схемы по переменному току, в котором транзистор заменяется линейным четырехполюсником относительно выбранной в графическом анализе рабочей точки.

Контрольные вопросы:

1. Графический анализ каскада с ОЭ
2. Динамическими проходными характеристиками являются
3. Точки пересечения семейства выходных ВАХ транзистора

Тема 11. Усилители мощности постоянного тока

Усилители постоянного тока, как может показаться из названия, сами по себе ток не усиливают, то есть они не генерируют никакой дополнительной мощности. Данные электронные устройства служат для управления электрическими колебаниями в определенном диапазоне частот начиная с 0 Гц. Но посмотрев на форму сигналов на входе и выходе усилителя постоянного тока, можно однозначно сказать — на выходе имеется усиленный входной сигнал, однако источники энергии для входного и выходного сигналов — индивидуальные.

По принципу действия усилители постоянного тока подразделяются на усилители прямого усиления и усилители с преобразованием.

Усилители постоянного тока с преобразованием преобразуют ток постоянный — в переменный, затем он усиливается и выпрямляется. Это называется усилением сигнала с модуляцией и демодуляцией — МДМ.

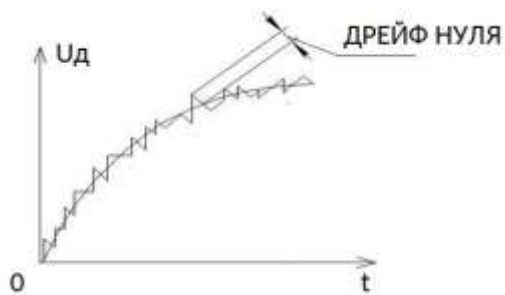
По принципу действия усилители постоянного тока подразделяются на усилители прямого усиления и усилители с преобразованием.

Усилители постоянного тока с преобразованием преобразуют ток постоянный — в переменный, затем он усиливается и выпрямляется. Это называется усилением сигнала с модуляцией и демодуляцией — МДМ

Схемы усилителей прямого усиления не содержат реактивных элементов, таких как катушки индуктивности и конденсаторы, сопротивление которых зависит от частоты. Вместо этого существует непосредственная гальваническая связь выхода (коллектора или анода) усилительного элемента одного каскада с входом (базой или сеткой) очередного каскада. По этой причине усилитель прямого усиления способен пропускать (усиливать) даже постоянный ток. Такие схемы популярны и в акустике.

Однако непосредственная гальваническая связь хотя и передает очень точно между каскадами перепады напряжения и медленные изменения тока, такое решение сопряжено с нестабильностью работы усилителя, с затруднением установления режима работы усилительного элемента.

Когда напряжение источников питания немного изменяется, или изменяется режим работы усилительных элементов, либо немного плывут их параметры, - тут же наблюдаются медленные изменения токов в схеме, которые по гальванически связанным цепям попадают во входной сигнал и соответствующим образом искажают форму сигнала на выходе. Зачастую эти паразитные изменения на выходе схожи по размаху с рабочими изменениями, вызываемыми нормальным входным сигналом.



Искажения выходного напряжения могут быть вызваны различными факторами. Прежде всего — внутренними процессами в элементах схемы. Нестабильное напряжение источников питания, нестабильные параметры пассивных и активных элементов схемы, особенно под действием перепадов температуры и т. д. Они могут быть вовсе не связаны с входным напряжением.

Изменения выходного напряжения вызванные данными факторами именуют дрейфом нуля усилителя. Максимальное изменение выходного напряжения в отсутствие входного сигнала усилителя (когда вход замкнут) за определенный временной промежуток, называется абсолютным дрейфом.

Напряжение дрейфа, приведенное ко входу равно отношению абсолютного дрейфа к коэффициенту усиления данного усилителя. Это напряжение определяет чувствительность усилителя, так как вносит ограничение в минимально различимый входной сигнал.

Чтобы усилитель работал нормально, напряжение дрейфа не должно быть больше заранее определенного минимального напряжения усиливаемого сигнала, который подается на его вход. В случае если дрейф выхода окажется того же порядка или будет превышать входной сигнал, искажения превысят допустимую норму для усилителя, и его рабочая точка окажется смещенной за пределы адекватной рабочей области характеристик усилителя («дрейф нуля»).

Для снижения дрейфа нуля прибегают к следующим приемам. Во-первых, все источники напряжения и тока, питающие каскады усилителя, делают стабилизированными. Во-вторых, используют глубокую отрицательную обратную связь. В-третьих, применяют схемы компенсации температурного дрейфа путем добавления нелинейных элементов, чьи параметры зависят от температуры. В-четвертых, используют балансирующие мостовые схемы. И наконец, постоянный ток преобразуют в переменный и затем усиливают переменный ток и выпрямляют.

При создании схемы усилителя постоянного тока очень важно согласовать потенциалы на входе усилителя, в точках сопряжения его каскадов, а также на нагрузочном выходе. Также необходимо обеспечить стабильность работы каскадов при различных режимах и даже в условиях плавающих параметров схемы.

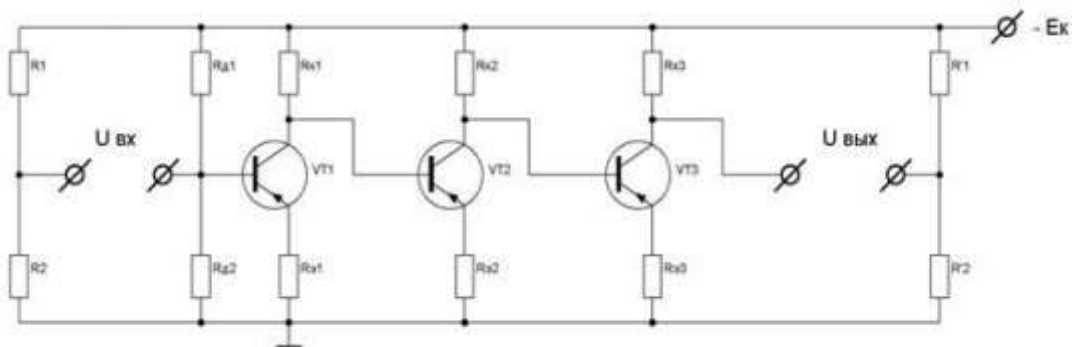
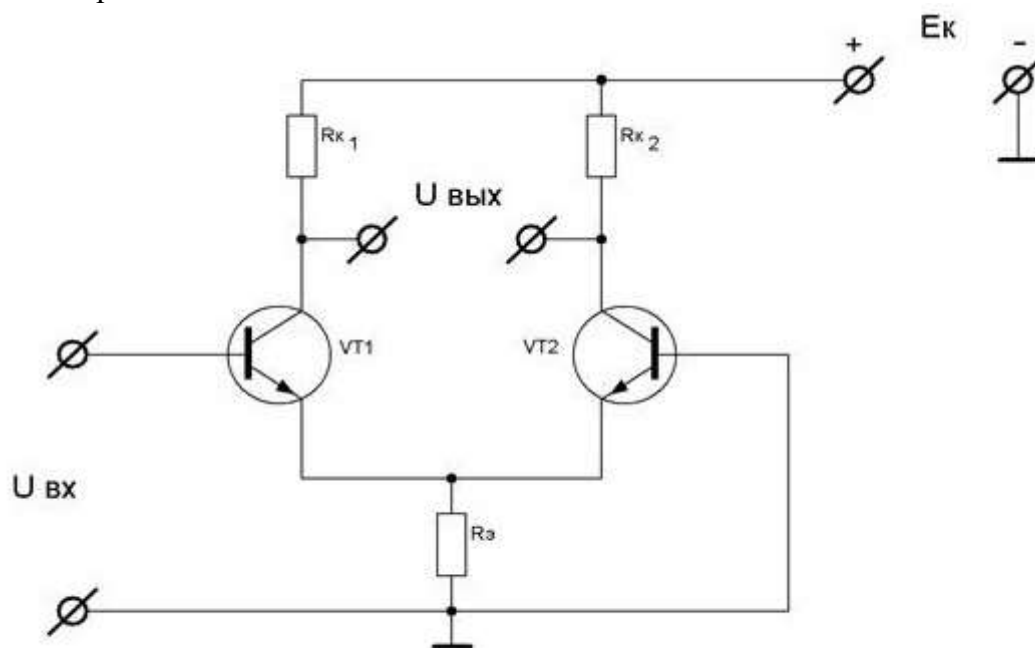


схема прямого усиления

Усилители постоянного тока бывают одноктактными и двухтактными. Одноктактные схемы прямого усиления предполагают непосредственную подачу выходного сигнала с одного элемента — на вход следующего. На вход следующего транзистора вместе с выходным сигналом от первого элемента (транзистора) подается коллекторное напряжение первого. Тут должны быть согласованы потенциалы коллектора первого и базы второго транзистора, для чего коллекторное напряжение первого транзистора компенсируют при помощи резистора. Резистор добавляют также в цепь эмиттера второго транзистора, чтобы сместить его напряжение база-эмиттер. Потенциалы на коллекторах транзисторов следующих каскадов также должны быть высокими, что тоже достигается применением согласующих резисторов.



параллельный балансный каскад

В двухтактном параллельном балансном каскаде резисторы коллекторных цепей и внутренние сопротивления транзисторов образуют собой четырехплечевой мост, на одну из диагоналей которого (между цепями коллектор-эмиттер) подается напряжение питания, а к другой (между коллекторами) — присоединяется нагрузка. Сигнал который требуется усилить прикладывается к базам двух транзисторов.

При равенстве коллекторных резисторов и полностью одинаковых транзисторах, разность потенциалов между коллекторами, в отсутствие входного сигнала, равна нулю. Если входной сигнал не равен нулю, то на коллекторах будут приращения потенциалов равные по модулю, но противоположные по знаку. На нагрузке между коллекторами появится переменный ток по форме повторяющий входной сигнал, но большей амплитуды.

Такие каскады часто применяются в качестве первичных каскадов многокаскадных усилителей либо в качестве выходных каскадов для получения симметричного напряжения и тока. Достоинство данных решений в том, что влияние температуры на оба плеча одинаково изменяет их характеристики и напряжение на выходе не плавает.

Контрольные вопросы:

- Усилители постоянного тока
- Схемы усилителей прямого усиления
- Усилители постоянного тока бывают

Раздел 3. Источники питания и преобразовательные устройства.

Тема 12. Неуправляемые выпрямители. Назначение и структурная схема выпрямителей

Основное назначение выпрямителя заключается в преобразовании переменного тока в постоянный (пульсирующий выпрямленный) ток. Выпрямительная установка выполняется на основе диодов и тиристоров, а в отдельных случаях на основе силовых транзисторов. Структурная схема выпрямителя представлена на рис. 3.1. Выпрямительная установка в общем случае представляет собой агрегат, состоящий из преобразовательного трансформатора 1, выпрямительной схемы 2, сглаживающего фильтра 3, устройств управления и защиты 4 и автоматического регулирования 5.

Дополнительной функцией выпрямителя может быть регулирование напряжения на выходе в результате изменения напряжения на входе выпрямительной установки или угла открытого состояния полупроводниковых приборов. Такие выпрямители называются *управляемыми*.

В некоторых случаях отдельные звенья выпрямителя могут отсутствовать. В неуправляемых выпрямителях, построенных на диодах, нет устройств управления и автоматического регулирования. Преобразовательный трансформатор не применяют, если нет необходимости согласовывать цепи источника и потребителя по напряжению. Когда

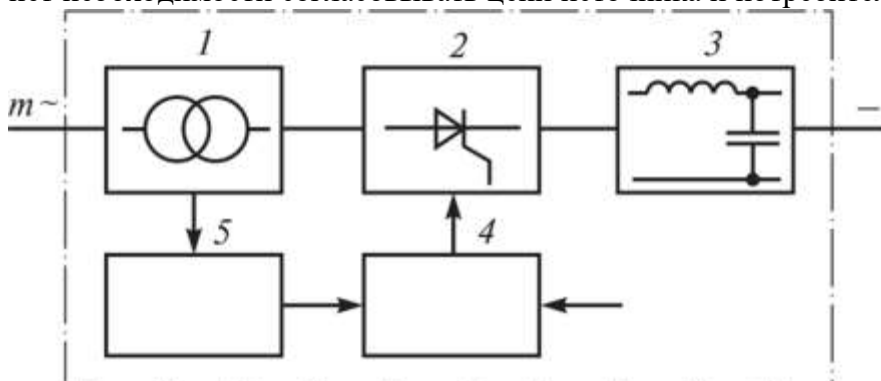


Рис. 3.1. Структурная схема выпрямителя не предъявляются определенные требования по качеству выпрямленного тока, может отсутствовать сглаживающее устройство.

Неуправляемые выпрямители не имеют устройств для регулирования напряжения трансформатора, а выпрямительные установки таких выпрямителей выполняются на диодах. В управляемых выпрямителях регулировать выходное напряжение можно переключая витки преобразовательного трансформатора или применяя управляемую выпрямительную установку на тиристорах или транзисторах. Выпрямители с управляемой выпрямительной установкой являются *обращаемыми* и могут работать в инверторном режиме. Выпрямительные установки, выполненные на тиристорах и диодах, обладающие свойствами регулирования напряжения, но не позволяющие осуществлять переход в режим инвертора, обычно называются *по-лууправляемыми*.

В зависимости от числа фаз питающей сети различают выпрямители однофазного и многофазного тока. Выпрямленное напряжение не идеально. Оно имеет определенное число пульсаций за период питающего напряжения. Число пульсаций q выпрямленного напряжения зависит от числа фаз питающей сети и от схемы соединения вторичных обмоток преобразовательного трансформатора и полупроводниковых приборов выпрямительной установки. Выпрямители однофазного тока могут быть

однопульсовыми ($q = 1$) и двухпульсовыми ($q = 2$). Выпрямители многофазного тока ($m > 1$) можно выполнить с числом пульсаций $q = km$, где $k = 1, 2, 3$ и т.д.

По структуре связей вторичной обмотки преобразовательного трансформатора и выпрямительной схемы различают нулевые и мостовые схемы выпрямителей.

В нулевых схемах нагрузка включается между выведенной нулевой точкой вторичной обмотки трансформатора и общей катодной или анодной точкой электронных приборов выпрямительной схемы. Нулевые схемы иначе называют *однотактными*, так как в течение одного периода по вторичным обмоткам ток протекает только один полупериод.

В мостовых схемах нагрузка включается между общими точками анодной и катодной групп полупроводниковых приборов. Вторичная обмотка трансформатора не имеет вывода нулевой точки, а полупроводниковые приборы парами присоединяются к выводам фаз вторичной обмотки трансформатора: один — анодом, другой — катодом. Пары приборов объединяются в схему моста. Мостовые схемы называют *двухтактными*, так как в каждой фазе вторичной обмотки трансформатора ток проходит в течение каждого полупериода, т.е. в каждом периоде обмотка нагружается в обоих направлениях.

Нулевые и мостовые схемы делятся на простые и сложные. Сложные схемы образуются из простых, при их параллельном или последовательном соединении на стороне выпрямленного тока. Структурная схема классификации выпрямителей представлена на рис. 3.2.

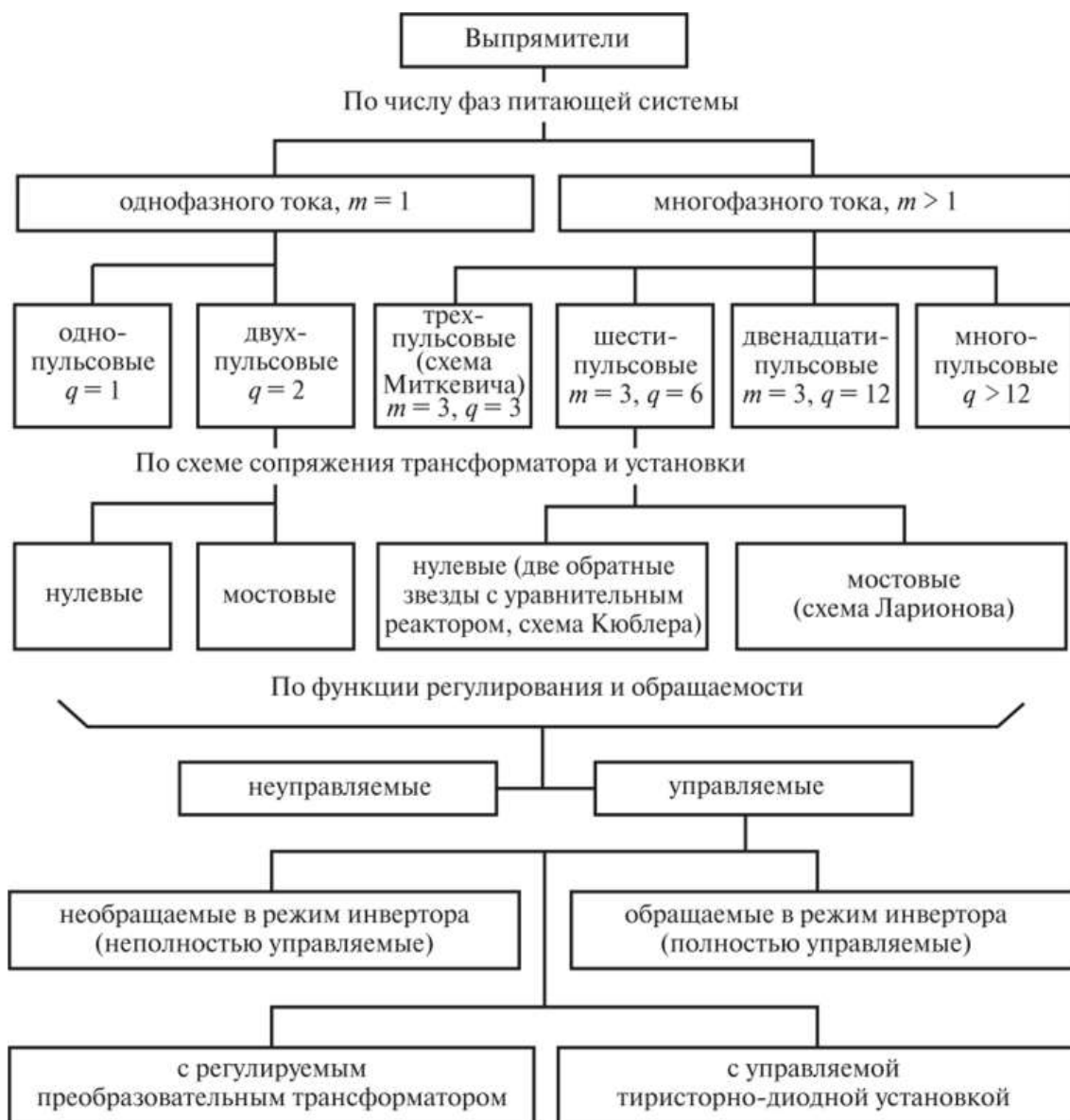


Рис. 3.2. Классификации выпрямителей

Основными характеристиками выпрямителей являются:

— номинальное напряжение постоянного тока — среднее значение выпрямленного напряжения, заданное техническими требованиями. Обычно указывается напряжение до фильтра U_d и напряжение после фильтра (или отдельных его звеньев — U). Определяется значением напряжения, необходимым для питаемых выпрямителем устройств;

— номинальный выпрямленный ток I_d — среднее значение выпрямленного тока, т.е. его постоянная составляющая, заданная техническими требованиями. Определяется результирующим током всех цепей, питаемых выпрямителем;

— напряжение сети $U_{сети}$ — напряжение сети переменного тока, питающей выпрямитель. Стандартное значение этого напряжения для бытовой сети — 220 В с допускаемыми отклонениями не более 10 %;

— пульсация — переменная составляющая напряжения или тока на выходе выпрямителя. Это качественный показатель выпрямителя;

— частота пульсаций — частота наиболее резко выраженной гармонической составляющей напряжения или тока на выходе выпрямителя. Для самой простой — однополупериодной схемы выпрямителя частота пульсаций равна частоте питающей сети. Двухполупериодные мостовые схемы и схемы удвоения напряжения дают пульсации, частота

которых равна удвоенной частоте питающей сети. Многофазные схемы выпрямления имеют частоту пульсаций, зависящую от схемы выпрямителя и числа фаз;

- коэффициент пульсаций — отношение амплитуды наиболее резко выраженной гармонической составляющей напряжения или тока на выходе выпрямителя к среднему значению напряжения или тока. Различают коэффициент пульсаций на входе фильтра ($p_0\%$) и коэффициент пульсаций на выходе фильтра ($/?\%$). Допускаемые значения коэффициента пульсаций на выходе фильтра определяются характером нагрузки;
- коэффициент фильтрации (коэффициент сглаживания) — отношение коэффициента пульсаций на входе фильтра к коэффициенту пульсаций на выходе фильтра $k_c = p^{\wedge}/p$. Для многосвязных фильтров коэффициент фильтрации равен произведению коэффициентов фильтрации отдельных звеньев;
- колебания (нестабильность) напряжения на выходе выпрямителя — изменение напряжения постоянного тока относительно номинального. При отсутствии стабилизаторов напряжения определяются отклонениями напряжения сети.

Контрольные вопросы:

1. Основное назначение выпрямителя
2. Дополнительной функцией выпрямителя может быть
3. Классификации выпрямителей
4. Неуправляемые выпрямители не имеют

Тема 13. Основные параметры управляемого выпрямителя.

Однофазная, трехфазная схема выпрямителя

Выпрямитель преобразует колеблющийся синусоидальный источник переменного напряжения в источник постоянного напряжения постоянного тока с помощью диодов, тиристоров, транзисторов или преобразователей. Этот процесс выпрямления может принимать различные формы с полуволновыми, двухполупериодными, неконтролируемыми и полностью управляемыми выпрямителями, преобразующими однофазный или трехфазный источник питания в постоянный уровень постоянного тока. В этом уроке мы рассмотрим однофазное выпрямление и все его формы.

Описание

Выпрямители являются одним из основных строительных блоков преобразования мощности переменного тока с полуволновым или двухволновым выпрямлением, обычно выполняемым полупроводниковыми диодами. Диоды позволяют переменным токам течь через них в прямом направлении, в то же время блокируя протекание тока в обратном направлении, создавая постоянный уровень напряжения постоянного тока, что делает их идеальными для выпрямления.

Однако постоянный ток, который выпрямляется диодами, не такой чистый, как ток, получаемый, скажем, от источника батареи, но имеет изменения напряжения в виде пульсаций, наложенных на него в результате переменного питания.

Но для однофазного выпрямления нам нужна синусоидальная форма переменного тока с фиксированным напряжением и частотой, как показано на рисунке.

Сигналы переменного тока обычно имеют два числа, связанных с ними. Первое число выражает степень вращения осциллограммы вдоль оси x , на которую генератор вращался от 0 до 360° . Это значение известно как период (T), который определяется как интервал, взятый для завершения одного полного цикла сигнала. Периоды измеряются в градусах, времени или радианах. Соотношение между периодами синусоидальных волн и частотой определяется как: $T = 1 / f$.

Второе число указывает амплитуду значения, тока или напряжения, вдоль оси y . Это число дает мгновенное значение от нуля до некоторого пикового или максимального значения (A_{MAX} , V_{MAX} или I_{MAX}), указывающее наибольшую амплитуду синусоидальных волн, прежде чем снова вернуться к нулю. Для синусоидальной формы волны есть два максимальных или пиковых значения, одно для положительных и одно для отрицательных полупериодов.

Но помимо этих двух ценностей есть еще две, которые представляют интерес для нас в целях исправления. Один — это **Среднее значение** сигналов, а другой — его **среднеквадратичное значение**. Среднее значение формы сигнала получается путем добавления мгновенных значений напряжения (или тока) в течение одного полупериода и обнаруживаются как: $0,6365 * V_p$. Обратите внимание, что среднее значение за один полный цикл симметричной синусоидальной волны равно нулю.

Среднеквадратическое значение или эффективное значение синусоиды (синусоида — это другое название синусоидальной волны) обеспечивает такое же количество энергии для сопротивления, что и источник постоянного тока того же значения. Среднеквадратическое значение (RMS) синусоидального напряжения (или тока) определяется следующим образом: $0,7071 * V_p$.

Принцип работы

Все однофазные выпрямители используют полупроводниковые устройства в качестве основного устройства преобразования переменного тока в постоянный. Однофазные неконтролируемые полуволновые выпрямители являются наиболее простой и, возможно, наиболее широко используемой схемой выпрямления для малых уровней мощности, поскольку на их выход сильно влияет реактивное сопротивление подключенной нагрузки. Для неконтролируемых выпрямительных цепей полупроводниковые диоды являются наиболее часто используемым устройством и расположены таким образом, чтобы создавать либо *полуволновую*, либо *двухполупериодную* схему выпрямителя. Преимущество использования диодов в качестве устройства выпрямления состоит в том, что по своей конструкции они являются однонаправленными устройствами, имеющими встроенный однонаправленный $p-n$ -переход.

Этот $p-n$ -переход преобразует двунаправленный переменный источник питания в однонаправленный ток, устраняя половину источника питания. В зависимости от подключения диода, он может, например, пропустить положительную половину сигнала переменного тока при прямом смещении, исключая при этом отрицательный полупериод, когда диод становится обратным смещением.

Обратное также верно, устраняя положительную половину или форму волны и передавая отрицательную половину. В любом случае, выход из одного диодного выпрямителя состоит только из одной половины формы сигнала 360° как показано на рисунке.

Полуволновое выпрямление

Приведенная выше конфигурация однофазного полуволнового выпрямителя пропускает положительную половину формы сигнала переменного тока, причем отрицательная половина исключается. Меняя направление диода, мы можем пропустить отрицательные половины и устранить положительные половины формы сигнала переменного тока. Поэтому на выходе будет серия положительных или отрицательных импульсов.

Таким образом, на подключенную нагрузку не подается напряжение или ток, R_L в течение половины каждого цикла. Другими словами, напряжение на сопротивлении нагрузки R_L состоит только из половины сигналов, либо положительных, либо отрицательных, поскольку оно работает только в течение половины входного цикла, отсюда и название *полуволнового выпрямителя*.

Надеемся, что мы видим, что диод позволяет току течь в одном направлении, создавая только выход, который состоит из полупериодов. Эта пульсирующая форма выходного сигнала не только изменяется ВКЛ и ВЫКЛ каждый цикл, но присутствует только в 50% случаев, и при чисто резистивной нагрузке это содержание пульсации высокого напряжения и тока является максимальным.

Этот пульсирующий постоянный ток означает, что эквивалентное значение постоянного тока падает на нагрузочном резисторе, поэтому R_L составляет только половину среднего значения синусоидальных сигналов. Поскольку максимальное значение синусоидальной формы сигнала равно $1 (\sin(90^\circ))$, среднее значение постоянного тока, полученное для половины синусоиды, определяется как: $0,637$ x максимальное значение амплитуды.

Таким образом, во время положительного полупериода A_{AVE} составляет $0,637 * A_{MAX}$. Однако, поскольку отрицательные полупериоды удалены из-за выпрямления диодом, среднее значение в течение этого периода будет нулевым, как показано.

Среднее значение синусоиды

Таким образом, для полуволнового выпрямителя в 50% случаев среднее значение составляет $0,637 * A_{MAX}$, а в 50% случаев — ноль. Если максимальная амплитуда равна 1, среднее значение или эквивалент значения постоянного тока, видимый по сопротивлению нагрузки, R_L будет:

Таким образом, соответствующие выражения для среднего значения напряжения или тока для полуволнового выпрямителя задаются как:

$$V_{AVE} = 0,318 * V_{MAX}$$

$$I_{AVE} = 0,318 * I_{MAX}$$

Обратите внимание, что максимальное значение A_{MAX} — это значение входного сигнала, но мы также могли бы использовать его среднеквадратичное значение или среднеквадратичное значение, чтобы найти эквивалентное выходное значение постоянного тока однофазного полуволнового выпрямителя. Чтобы определить среднее напряжение для полуволнового выпрямителя, мы умножаем среднеквадратичное значение на 0,9 (форм-фактор) и делим произведение на 2, то есть умножаем его на 0,45, получая:

$$V_{AVE} = 0,45 * V_{RMS}$$

$$I_{AVE} = 0,45 * I_{RMS}$$

Затем мы можем видеть, что схема полуволнового выпрямителя преобразует либо положительные, либо отрицательные половины формы сигнала переменного тока в импульсный выход постоянного тока, который имеет значение $0,318 * A_{MAX}$ или $0,45 * A_{RMS}$, как показано.

Полноволновое выпрямление

В отличие от предыдущего полуволнового выпрямителя, *двухполупериодный выпрямитель* использует обе половины входной синусоидальной формы волны для обеспечения однонаправленного выхода. Это происходит потому, что двухполупериодный выпрямитель в основном состоит из двух полуволновых выпрямителей, соединенных вместе для питания нагрузки.

Однофазный двухполупериодный выпрямитель делает это с помощью четырех диодов, расположенных в виде моста, пропускающих положительную половину формы волны, как и раньше, но инвертирующих отрицательную половину синусоидальной волны для создания пульсирующего выхода постоянного тока. Несмотря на то, что напряжение и ток

на выходе выпрямителя пульсируют, оно не меняет направление, используя полные 100% формы входного сигнала и, таким образом, обеспечивает двухполупериодное выпрямление.

Однофазный двухполупериодный мостовой выпрямитель

Эта мостовая конфигурация диодов обеспечивает двухполупериодное выпрямление, потому что в любое время два из четырех диодов смещены в прямом направлении, а два других — в обратном. Таким образом, в проводящем тракте два диода вместо одного для полуволнового выпрямителя. Следовательно, будет разница в амплитуде напряжения между V_{IN} и V_{OUT} из-за двух прямых падений напряжения на последовательно соединенных диодах. Здесь, как и прежде, для простоты математики мы примем идеальные диоды.

Так как же работает однофазный двухполупериодный выпрямитель? Во время положительного полупериода V_{IN} диоды D_1 и D_4 смещены в прямом направлении, а диоды D_2 и D_3 — в обратном. Затем для положительного полупериода входного сигнала ток течет по пути: $D_1 — A — R_L — B — D_4$ и возвращается к источнику питания.

Во время отрицательного полупериода V_{IN} диоды D_3 и D_2 смещены в прямом направлении, а диоды D_4 и D_1 — в обратном. Затем для отрицательного полупериода входного сигнала ток течет по пути: $D_3 — A — R_L — B — D_2$ и возвращается к источнику питания.

В обоих случаях положительные и отрицательные полупериоды входного сигнала создают положительные выходные пики независимо от полярности входного сигнала и, как таковой, ток нагрузки I всегда течет в том же направлении через нагрузку, R_L между точками или узлами A и B . Таким образом, отрицательный полупериод источника становится положительным полупериодом при нагрузке.

Таким образом, в зависимости от того множества проводящих диодов, узел A всегда более положительный, чем узел B . Поэтому ток и напряжение нагрузки являются однонаправленными или постоянными, что дает нам следующую форму выходного сигнала.

Форма волны на выходе выпрямителя

Хотя этот пульсирующий выходной сигнал использует 100% входного сигнала, его среднее напряжение постоянного тока не совпадает с этим значением. Мы помним сверху, что среднее значение постоянного тока, полученное для половины синусоиды, определяется как: $0,637$ x максимальное значение амплитуды. Однако, в отличие от описанного выше полуволнового выпрямления, двухполупериодные выпрямители имеют два положительных полупериода на входной сигнал, что дает нам другое среднее значение.

Среднее значение двухполупериодного выпрямителя

Здесь мы можем видеть, что для двухполупериодного выпрямителя для каждого положительного пика имеется среднее значение $0,637 * A_{MAX}$ и, поскольку на входной сигнал имеется два пика, это означает, что есть две серии средних значений, суммируемых вместе. Таким образом, выходное напряжение постоянного тока двухполупериодного выпрямителя в два раза выше, чем у предыдущего полуволнового выпрямителя. Если максимальная амплитуда равна 1, среднее значение или эквивалент значения постоянного тока, видимый по сопротивлению нагрузки, R_L будет:

Таким образом, соответствующие выражения для среднего значения напряжения или тока для двухполупериодного выпрямителя задаются как:

$$V_{AVE} = 0,637 * V_{MAX}$$

$$I_{AVE} = 0,637 * I_{MAX}$$

Как и прежде, максимальное значение A_{MAX} — это значение входного сигнала, но мы также могли бы использовать его среднеквадратичное значение, чтобы найти эквивалентное выходное значение постоянного тока однофазного двухполупериодного выпрямителя. Чтобы определить среднее напряжение для двухполупериодного выпрямителя, мы умножаем среднеквадратичное значение на $0,9$:

$$V_{AVE} = 0,9 * V_{RMS}$$

$$I_{AVE} = 0,9 * I_{RMS}$$

Затем мы можем видеть, что двухполупериодная схема выпрямителя преобразует ОБЕ положительную или отрицательную половинки сигнала переменного тока в импульсный выход постоянного тока, который имеет значение $0,637 * A_{MAX}$ или $0,9 * A_{RMS}$.

Полноволновой полууправляемый мостовой выпрямитель

Двухполупериодное выпрямление имеет много преимуществ по сравнению с более простым полуволновым выпрямителем, например, выходное напряжение более согласовано, имеет более высокое среднее выходное напряжение, входная частота удваивается в процессе выпрямления и требует меньшего значения емкости сглаживающего конденсатора, если таковой требуется. Но мы можем улучшить конструкцию мостового выпрямителя, используя тиристоры вместо диодов в его конструкции.

Заменяв диоды внутри однофазного мостового выпрямителя тиристорами, мы можем создать фазо-управляемый выпрямитель переменного тока в постоянный для преобразования постоянного напряжения питания переменного тока в контролируемое выходное напряжение постоянного тока. Фазоуправляемые выпрямители, полууправляемые или полностью управляемые, имеют множество применений в источниках питания переменного тока и в управлении двигателями.

Однофазный мостовой выпрямитель — это то, что называется «неуправляемым выпрямителем» в том смысле, что приложенное входное напряжение передается непосредственно на выходные клеммы, обеспечивая фиксированное среднее значение эквивалентного значения постоянного тока. Чтобы преобразовать неуправляемый мостовой выпрямитель в однофазную полууправляемую выпрямительную цепь, нам просто нужно заменить два диода тиристорами (SCR), как показано на рисунке.

В конфигурации с полууправляемым выпрямителем среднее напряжение нагрузки постоянного тока контролируется с использованием двух тиристоров и двух диодов. Как мы узнали из нашего урока о тиристорах, тиристор будет проводить (состояние «ВКЛ») только тогда, когда его анод (A) более положительный, чем его катод (K) и импульс запуска подается на его затвор (G). В противном случае он остается неактивным.

Мы также узнали, что после включения тиристор снова выключается только после того, как его сигнал затвора удален, а ток анода упал ниже удерживающего тока тиристоров I_H , поскольку переменное напряжение питания переменного тока смещает его. Таким образом, задерживая импульс запуска, подаваемый на клемму затвора тиристоров, на контролируемый период времени или угол (α) после того, как напряжение питания переменного тока прошло пересечение нулевого напряжения между анодным и катодным напряжением, мы можем контролировать, когда тиристор начинает проводить ток и, следовательно, контролировать среднее выходное напряжение.

Во время положительного полупериода входного сигнала ток течет по пути: SCR₁ и D₂ и обратно к источнику питания. Во время отрицательного полупериода V_{IN} проводимость проходит через SCR₂ и D₁ и возвращается к источнику питания.

Понятно, что один тиристор из верхней группы (SCR₁ или SCR₂) и соответствующий ему диод из нижней группы (D₂ или D₁) должны проводить вместе, чтобы протекать ток любой нагрузки.

Таким образом, среднее выходное напряжение V_{AVE} зависит от угла включения α для двух тиристоров, включенных в полууправляемый выпрямитель, поскольку два диода неуправляются и пропускают ток всякий раз, когда смещено вперед. Таким образом, для любого угла срабатывания затвора α среднее выходное напряжение определяется как:

Обратите внимание, что максимальное среднее выходное напряжение возникает, когда $\alpha = 1$, но все еще равно $0,637 * V_{\text{MAX}}$, как для однофазного неуправляемого мостового выпрямителя.

Мы можем использовать эту идею для контроля среднего выходного напряжения моста на один шаг вперед, заменив все четыре диода тиристорами, что дает нам *полностью управляемую* схему мостового выпрямителя.

Полностью управляемый мостовой выпрямитель

Однофазные мостовые выпрямители с полным управлением известны чаще как преобразователи переменного тока в постоянный. Полностью управляемые мостовые преобразователи широко используются в управлении скоростью машин постоянного тока и легко достигаются путем замены всех четырех диодов мостового выпрямителя тиристорами, как показано на рисунке.

В конфигурации с полностью управляемым выпрямителем среднее напряжение нагрузки постоянного тока контролируется с использованием двух тиристорov на полупериод. Тиристоры SCR_1 и SCR_4 запускаются вместе как пара во время положительного полупериода, в то время как тиристоры SCR_3 и SCR_2 также запускаются вместе как пара во время отрицательного полупериода. Это 180° после SCR_1 и SCR_4 .

Затем в режиме работы с непрерывной проводимостью четыре тиристора постоянно переключаются в виде чередующихся пар для поддержания среднего или эквивалентного выходного напряжения постоянного тока. Как и в случае полууправляемого выпрямителя, выходное напряжение можно полностью контролировать, изменяя угол задержки включения тиристорov (α).

Таким образом, выражение для среднего напряжения постоянного тока однофазного полностью управляемого выпрямителя в режиме непрерывной проводимости дается как: со средним выходным напряжением, изменяющимся от V_{MAX} / π до $-V_{\text{MAX}} / \pi$ путем изменения угла зажигания, α от π до 0 соответственно. Поэтому, когда $\alpha < 90^\circ$ среднее напряжение постоянного тока является положительным, а когда $\alpha > 90^\circ$ среднее напряжение постоянного тока является отрицательным. То есть мощность течет от нагрузки постоянного тока к источнику переменного тока.

Резюме однофазного выпрямления

Мы увидели в этом уроке об однофазном выпрямлении, что однофазные выпрямители могут принимать различные формы для преобразования переменного напряжения в постоянное напряжение из неконтролируемых однофазных выпрямителей на полуволнах в полностью управляемые двухполупериодные мостовые выпрямители с использованием четырех тиристорov.

Преимуществами полуволнового выпрямителя являются его простота и низкая стоимость, так как для него требуется только один диод. Однако это не очень эффективно, так как используется только половина входного сигнала, дающего низкое среднее выходное напряжение.

Двухполупериодный выпрямитель более эффективен, чем полуволновой выпрямитель, поскольку он использует оба полупериода входной синусоидальной волны, создавая более высокое среднее или эквивалентное выходное напряжение постоянного тока. Недостатком двухполупериодной мостовой схемы является то, что она требует четырех диодов.

Фазоуправляемое выпрямление использует комбинации диодов и тиристорov (SCR) для преобразования входного напряжения переменного тока в контролируемое выходное напряжение постоянного тока. Полностью контролируемые выпрямители используют четыре тиристора в своей конфигурации, тогда как наполовину управляемые выпрямители используют комбинацию как тиристорov, так и диодов.

Тогда независимо от того, как мы это делаем, преобразование синусоидального сигнала переменного тока в постоянный источник постоянного тока называется **выпрямлением**.

Контрольные вопросы:

1. Что такое однофазный выпрямитель
2. Что такое выпрямитель
3. Принцип работы
4. Полноволновой полу управляемый мостовой выпрямитель

Тема 14. Порядок расчета выпрямителя с фильтром сглаживания.

В данной статье расскажем про сглаживающие фильтры питания, покажем пример определения выходного напряжения, и подбора сглаживающего конденсатора для источника вторичного питания.

Сглаживающие фильтры питания предназначены для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения. Принцип работы простой – во время действия полуволны напряжения происходит заряд реактивных элементов (конденсатора, дросселя) от источника – диодного выпрямителя, и их разряд на нагрузку во время отсутствия, либо малого по амплитуде напряжения.

Основные схемы сглаживающих фильтров питания

Простейшим методом сглаживания пульсаций является применение фильтра в виде конденсатора достаточно большой ёмкости, шунтирующего нагрузку (сопротивление нагрузки). Конденсатор хорошо сглаживает пульсации, если его емкость такова, что выполняется условие:

$$1 / (\omega C) \ll R_n$$

Во время действия синусоидального сигнала, когда напряжение на диоде выпрямителя прямое, через диод проходит ток, заряжающий конденсатор до напряжения, близкого к максимальному. Когда напряжение на выходе диодного выпрямителя оказывается меньше напряжения заряда конденсатора, конденсатор разряжается через нагрузку R_n и создает на ней напряжение, которое постепенно снижается по мере разряда конденсатора через нагрузку. В каждый следующий полупериод конденсатор подзаряжается и его напряжение снова возрастает.

Чем больше емкость C и сопротивление нагрузки R_n , тем медленнее разряжается конденсатор, тем меньше пульсации и тем ближе среднее значение выходного напряжения U_{cp} к максимальному значению синусоиды U_{max} . Если нагрузку вообще отключить, то в режиме холостого хода на конденсаторе получится постоянное напряжение равное U_{max} , без всяких пульсаций.

Работа простейшего сглаживающего фильтра на конденсаторе в цепи однополупериодного выпрямителя поясняется рисунком и эпюрами:

Красным цветом показано напряжение на выходе выпрямителя без сглаживающего конденсатора, а синим – при его наличии.

Если пульсации должны быть малыми, или сопротивление нагрузки R_n мало, то необходима чрезмерно большая емкость конденсатора, т.е. сглаживание пульсаций одним

конденсатором практически осуществить нельзя. Приходится использовать более сложный сглаживающий фильтр.

Работа сглаживающего Г-образного фильтра на конденсаторе и дросселе в цепи двухполупериодного мостового выпрямителя поясняется рисунком и эпюрами:

Как и в примере с однополупериодным выпрямителем, красным цветом показано напряжение на выходе выпрямителя без сглаживающих элементов (конденсатора и дросселя), а синим – при их наличии.

Логично следует, что чем больше ёмкости и индуктивности фильтров, и чем больше в нём реактивных элементов (сложнее фильтр), тем меньше коэффициент пульсаций такого выпрямителя.

В качестве сглаживающих конденсаторов используются электролитические конденсаторы. Чем больше ёмкость, тем лучше. Кроме того, для надёжности, конденсаторы должны быть рассчитаны на напряжение в полтора-два раза превышающее выходное напряжение диодного моста.

Определение выходного напряжения выпрямителя и выбор сглаживающего фильтра для блока вторичного питания

К описанному в статье, следует добавить важную информацию, используемую для конструирования источников (блоков) питания постоянного тока:

1. Любой р-п переход, любого полупроводникового прибора, в том числе диода имеет характеристику – падение напряжения на переходе. Это напряжение обычно указывают в справочниках. Для германиевых диодов оно может быть от 0,3 вольт до 0,5 вольт, а для кремниевых диодов – от 0,6 вольт до 1,5 вольт.

Это значит, что если мы возьмём трансформатор с выходным напряжением 6,3 вольта, выпрямим его однофазным двухполярным мостовым выпрямителем (диодным мостом) у которого на каждом диоде по справочнику падает по 1 вольту ($U_{пр.} = 1 \text{ В}$), то на выходе выпрямителя мы получим всего лишь 4,3 вольта. Напряжение в 2 вольта «потеряется» на 2-х диодах по пути прохождения тока. Начинающие радиолюбители обычно этого не учитывают, потому и недоумевают, почему на выходе маленькое напряжение.

2. Переменный электрический ток измеряется приборами, которые, как правило, показывают его среднее значение, а не максимальное. Максимальное значение переменного напряжения это – значение электрического напряжения соответствующее его максимальному значению синусоиды.

Среднее значение напряжения на выходе однополупериодного выпрямителя соответствует значению:

$$U_{cp} = U_{max} / \pi = 0,318 * U_{max}$$

Среднее значение напряжения на выходе двухполупериодного выпрямителя соответствует значению:

$$U_{cp} = 2 U_{max} / \pi = 0,636 * U_{max}$$

Значение среднего напряжения — 0,636 за счёт особенностей конструкции измерительных приборов округляется и принимается равной 0,7.

3. Исходя из изложенного выше, можно сделать вывод, который справедлив в том случае, когда нагрузка на блок питания маленькая. Обратите внимание на рисунки ниже.

Выходное напряжение выпрямителей с фильтром питания:

а) с большой нагрузкой :

б) с маленькой нагрузкой :

Эти рисунки поясняют, что при малой нагрузке выходное напряжение выпрямителя с фильтром питания равно максимальной амплитуде синусоиды поступающей на выпрямитель, за вычетом падения напряжения на диодах.

Пример определения выходного напряжения, и подбора сглаживающего конденсатора для источника вторичного питания

Рассмотрим случай со средним переменным напряжением на выходе трансформатора, измеренным мультиметром равным **6,3 вольт**, и нагрузкой (сопротивлением нагрузки) равной **200 Ом**.

Выходное напряжение с мостового выпрямителя будет определено следующим образом:

— максимальное напряжение на выходе трансформатора:

$$U_{\max} = U_{\text{изм}} / 0,7 = 6,3\text{В} / 0,7 = 9 \text{ вольт}$$

— максимальное выходное напряжение на выходе выпрямителя:

$$U_{\text{вых.}} = U_{\max} - U_{\text{VD1}} - U_{\text{VD2}} = 9 - 1 - 1 = 7 \text{ вольт}$$

— емкость сглаживающего конденсатора выбираем из условия:

$$1 / (2 * \pi * f * C) \ll R_{\text{н}}, \text{ откуда } 1 / (2 * \pi * f * R_{\text{н}}) \ll C$$

— подставим данные:

$$1 / (2 * 3,14 * 50 * 200) = 1,59 * 10^{-5} \text{ (Фарад)} = 15,9 \text{ мкФ}$$

— учитывая условие, при котором емкость конденсатора должна быть намного больше полученному по приведенному условию, **выбираем конденсатор ёмкостью более чем в пять раз больше расчётного значения — 100 мкФ*16 вольт.**

Схема, состоящая из трансформатора, выпрямителя и сглаживающего фильтра является источником нестабилизированного питания. От таких источников можно питать любые устройства, потребляющие слабый ток, не критичные к наличию пульсаций и нестабильности питающего напряжения. Для максимального подавления пульсаций и стабилизации питающего напряжения применяют Стабилизаторы напряжения.

Контрольные вопросы:

1. Основные схемы сглаживающих фильтров питания
2. Определение выходного напряжения выпрямителя и выбор сглаживающего фильтра для блока вторичного питания
3. Пример определения выходного напряжения, и подбора сглаживающего конденсатора для источника вторичного питания

Тема 15. Стабилизаторы, фильтры сглаживания.

Сглаживающие фильтры предназначены для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения. Сглаживание пульсаций оценивают коэффициентом сглаживания ρ .

Основными элементами сглаживающих фильтров являются конденсаторы, [катушки индуктивности](#) и транзисторы, сопротивление которых различно для постоянного и переменного токов.

В зависимости от типа фильтрующего элемента различают емкостные, индуктивные и электронные фильтры. По количеству фильтрующих звеньев фильтры делятся на однозвенные и многозвенные.

Емкостной фильтр представляет собой конденсатор большой емкости, который включается параллельно нагрузочному резистору $R_{\text{н}}$. Конденсатор обладает большим сопротивлением постоянному току и малым сопротивлением переменному току. Рассмотрим работу фильтра на примере схемы однополупериодного выпрямителя (рис. 1, а).

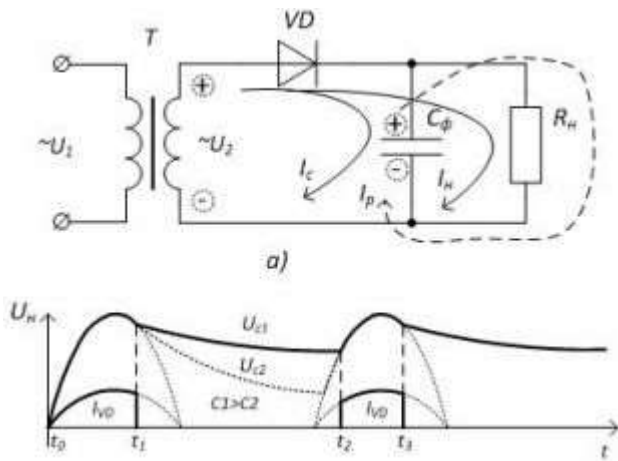


Рисунок 1 - Однофазный однополупериодный выпрямитель с емкостным фильтром: а) схема б) временные диаграммы работы

При протекании положительной полуволны во временном промежутке $t_0 - t_1$ (рис. 2.63, б) протекает ток нагрузки (ток диода) и ток заряда конденсатора. Конденсатор заряжается и в момент времени t_1 напряжение на конденсаторе превышает спадающее напряжение вторичной обмотки – диод закрывается и во временной промежуток $t_1 - t_2$ ток в нагрузке обеспечивается разрядом конденсатора. Т.о. ток в нагрузке протекает постоянно, что значительно уменьшает пульсации выпрямленного напряжения.

Чем больше емкость конденсатора C_ϕ , тем меньше пульсаций. Это определяется временем разряда конденсатора - постоянной времени разряда $\tau = C_\phi R_n$. При $\tau > 10$ коэффициент сглаживания определяется по формуле $q = 2\pi f_c m C_\phi R_n$, где f_c – частота сети, m – число полупериодов выпрямленного напряжения.

Емкостный фильтр целесообразно применять с высокоомным нагрузочным резистором R_n при небольших мощностях нагрузки.

Индуктивный фильтр (дроссель) включается последовательно с R_n (рис. 3, а). Индуктивность обладает малым сопротивлением постоянному току и большим переменному. Сглаживание пульсаций основывается на явлении самоиндукции, которая изначально препятствует нарастанию тока, а затем поддерживает его при уменьшении (рис. 2, б).

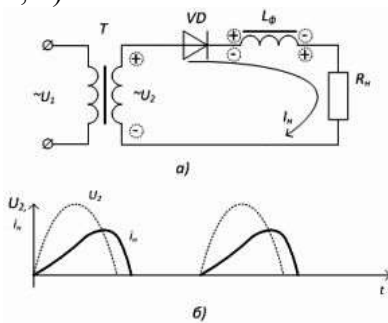


Рисунок 2 - Однофазный однополупериодный выпрямитель с индуктивным фильтром: а) схема, б) временные диаграммы работы

Индуктивные фильтры применяют в выпрямителях средней и большой мощностей, т. е. в выпрямителях, работающих с большими токами нагрузки.

Коэффициент сглаживания определяется по формуле: $q = 2\pi f_c m L_\phi / R_n$

Работа емкостного и индуктивного фильтра основана на том, что во время протекания тока, потребляемого из сети, конденсатор и катушка индуктивности запасают энергию, а когда тока от сети нет, либо он уменьшается, элементы отдают накопленную энергию, поддерживая ток (напряжение) в нагрузке.

Многосвязные фильтры используют сглаживающие свойства и конденсаторов и катушек индуктивности. В маломощных выпрямителях, у которых сопротивление нагрузочного резистора составляет несколько кОм, вместо дросселя L_{ϕ} включают резистор R_{ϕ} , что существенно уменьшает массу и габариты фильтра.

На рисунке 3 представлены типы многосвязных LC- и RC- фильтров.

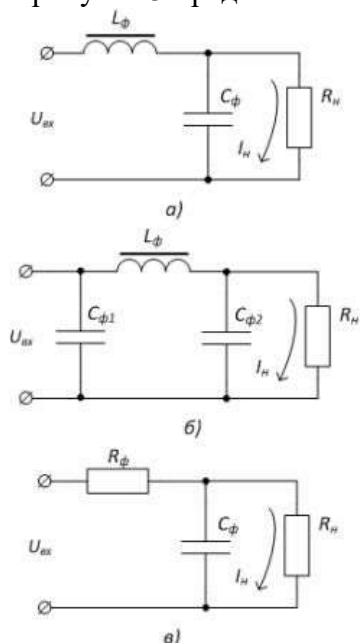


Рисунок 3 – Многосвязные фильтры: а) Г - образный LC, б) П- образный LC, в) RC - фильтр

Стабилизаторы предназначены для стабилизации постоянного напряжения (тока) на нагрузке при колебаниях сетевого напряжения и изменении потребляемого нагрузкой тока. Стабилизаторы подразделяются на стабилизаторы напряжения и тока, а также на параметрические и компенсационные. Стабильность выходного напряжения оценивают коэффициентом стабилизации $K_{ст}$.

Параметрический стабилизатор основан на использовании элемента с нелинейной характеристикой - полупроводникового стабилитрона. Напряжение на стабилитроне почти постоянно при значительном изменении обратного тока через прибор.

Схема параметрического стабилизатора приведена на рисунке 4. Входное напряжение $U_{вх}$ распределяется между ограничивающим резистором $R_{огр}$ и параллельно включенными стабилитроном VD и резистором нагрузки R_{H} .

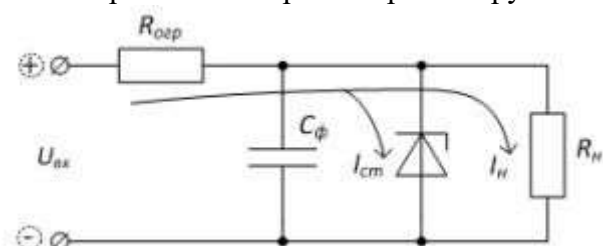


Рисунок 4 – Параметрический стабилизатор

При увеличении входного напряжения ток через стабилитрон увеличится, значит, увеличится ток через ограничивающий резистор, и на нём будет происходить большее падение напряжения, а напряжение нагрузки останется неизменным.

Параметрический стабилизатор имеет $K_{ст}$ порядка 20 - 50. Недостатками такого типа стабилизаторов являются малые токи стабилизации и низкий КПД.

Параметрические стабилизаторы применяют в качестве вспомогательных опорных источников напряжения, а также когда ток нагрузки невелик - не более сотен миллиампер.

Компенсационный стабилизатор использует в качестве ограничивающего резистора переменное сопротивление транзистора. С ростом входного напряжения возрастает и сопротивление транзистора, соответственно с уменьшением напряжения уменьшается сопротивление. При этом напряжение на нагрузке остается неизменным.

Схема стабилизатора на транзисторах представлена на рисунке 5. Принцип регулирования выходного напряжения $U_{Rн}$ основан на изменении проводимости регулирующего транзистора VT1.

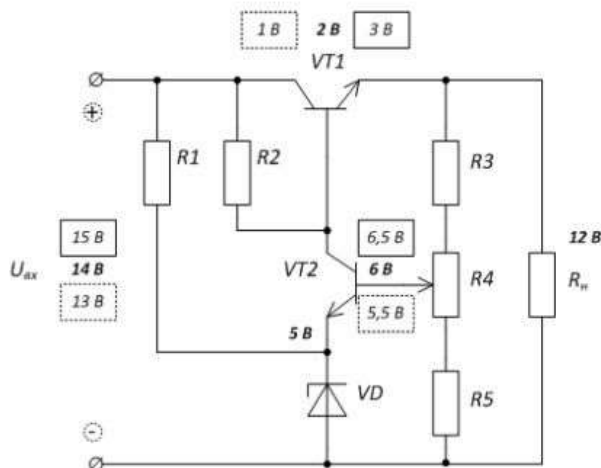


Рисунок 5 – Схема компенсационного стабилизатора напряжения

На транзисторе VT2 собрана схема сравнения напряжений и усилитель постоянного тока. В цепь его базы включена измерительная цепь R3, R4, R5, в цепь эмиттера - источник опорного напряжения R1VD.

Например, при увеличении входного напряжения, выходное также возрастёт, что приведёт к росту напряжения на базе транзистора VT2, в тоже время потенциал эмиттера VT2 останется прежним. Это приведёт к увеличению тока базы, а значит и тока коллектора транзистора VT2 – потенциал базы транзистора VT1 уменьшится, транзистор подзакроется и на нём будет происходить большее падение напряжения, а выходное напряжение останется неизменным.

На сегодняшний день стабилизаторы выпускают в виде интегральных схем. Типовая схема включения интегрального стабилизатора изображена на рисунке 6.

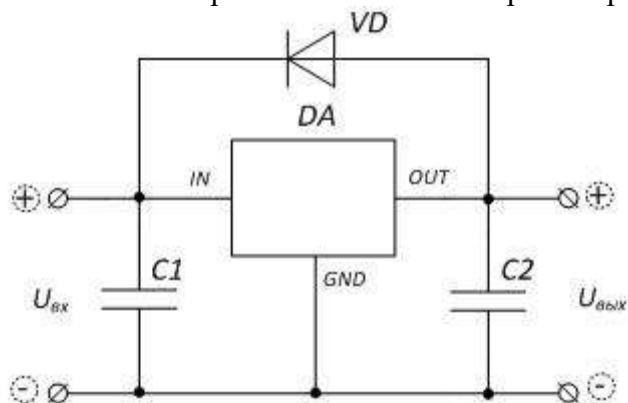


Рисунок 6 – Типовая схема включения интегрального стабилизатора напряжения

Обозначение выводов микросхемы стабилизатора: "IN" – вход, "OUT" – выход, "GND" - общий (корпус). Если стабилизатор регулируемый, то имеется вывод "ADJ" - регулировка. Выбор стабилизатора производится исходя из значения выходного напряжения, максимального тока нагрузки и диапазона изменения входного напряжения.

Контрольные вопросы

1. Сглаживающие фильтры
2. Емкостной фильтр
3. Многозвенные фильтры
4. Компенсационный стабилизатор

Тема 16. Инверторы и преобразователи

Тиристорные инверторы – это устройства, которые работают на автономную нагрузку и предназначены для преобразования напряжения постоянного тока в напряжение переменного тока заданной или регулируемой частоты. *Инвертированием* называют процесс преобразования энергии постоянного тока в энергию переменного тока (рис. 1).

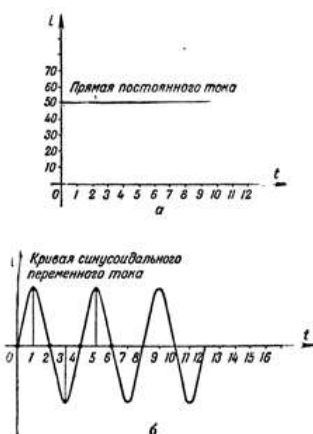


Рис.1 Диаграмма постоянного и переменного тока.

Применение:

1. В системах электроснабжения потребителей переменного тока, когда единственным источником питания является источник напряжения постоянного тока (например: аккумуляторная или солнечная батарея).
2. В системах гарантированного электроснабжения при исчезновении напряжения сети питания (например: для личных нужд электростанций, ЭВМ).
3. Для частотного регулирования скорости асинхронных двигателей.
4. Для питания потребителей переменного тока от линий электроснабжений постоянного тока.
5. В конверторах для преобразования постоянного напряжения одной величины в постоянное напряжение другой величины.

Коммутационными элементами в инверторах являются тиристоры или силовые транзисторы.

Инверторы подразделяют на:

1. Автономные инверторы и преобразователи частоты.

2. Инверторы, ведомые сетью.

Автономные инверторы и преобразователи частоты.

Автономные инверторы — это устройства, преобразующие постоянный ток в переменный с постоянной или регулируемой частотой и работающие на автономную нагрузку. В отличие от инверторов, ведомых сетью, у автономного инвертора на стороне переменного тока нет другого источника энергии той же частоты, кроме самого инвертора.

Преобразователи частоты — это устройства, преобразующие переменный ток одной частоты в переменный ток другой частоты.

К автономным инверторам и преобразователям частоты, работающим в конкретной установке, предъявляются следующие требования:

- 1) обеспечение максимального к. п. д.;
- 2) минимальная установленная мощность отдельных узлов и элементов;
- 3) возможность широкого регулирования выходного напряжения;
- 4) обеспечение стабильности выходного напряжения при изменении величины и характера нагрузки, а также входного напряжения;
- 5) обеспечение синусоидальной или близкой к синусоидальной формы кривой выходного напряжения;
- 6) возможность регулирования в определенных пределах выходной частоты, что прежде всего необходимо в установках вентильного электропривода;
- 7) отсутствие срывов инвертирования при перегрузках;
- 8) возможность работы в режиме холостого хода;
- 9) обеспечение максимальной надежности и устойчивости. Естественно, что требования, предъявляемые к схемам автономных инверторов, зависят от конкретного назначения инвертора. Поэтому оптимальный вариант схемы инвертора необходимо выбирать, учитывая режим работы питающихся от него нагрузок.

Автономные инверторы можно классифицировать по следующим основным признакам:

- 1) по схеме преобразования;
- 2) по способу коммутации (запираания);
- 3) по способу управления;
- 4) по характеру протекания электромагнитных процессов.

Различают следующие основные схемы преобразования:

- 1) одновентильную (рис. 2.1, а);
- 2) однофазную с нулевым выводом (рис. 2.1, б);
- 3) однофазную с нулевым выводом источника питания (рис. 2.1, в);
- 4) однофазную мостовую (рис. 2.1, г);
- 5) трехфазную мостовую (рис. 2.1, д);
- 6) трехфазную с нулевым выводом (рис. 2.1, е).

Все остальные схемы являются производными перечисленных групп. Наибольшее распространение в преобразовательной технике находят мостовые схемы. По способу коммутации автономные инверторы можно разделить на несколько групп.

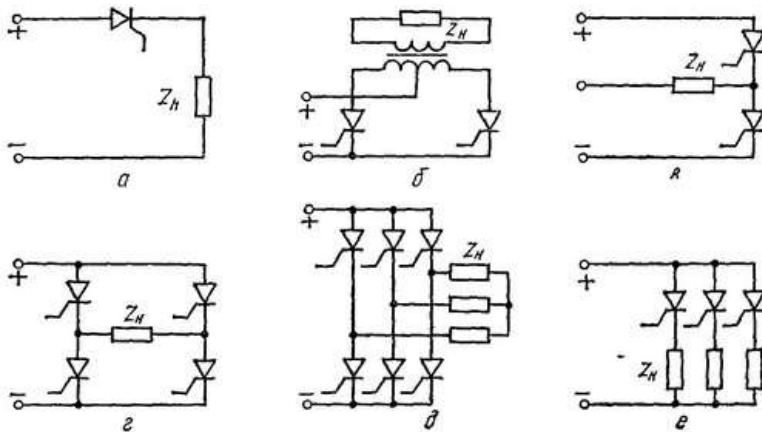


Рис. 2.1. Схемы преобразования

Инверторы с индивидуальной коммутацией. Коммутирующее устройство инвертора служит для запирающего одного тиристора (вентильного плеча) инвертора. К данному типу инверторов относятся инверторы на полностью управляемых вентилях — двухоперационных тиристорах и силовых транзисторах.

Инверторы с пофазной коммутацией. Коммутирующее устройство инвертора служит для попеременного запирающего тиристоры двух вентильных плеч, относящихся к одной фазе инвертора.

Инверторы с групповой коммутацией. В таких инверторах для запирающего всех вентильных плеч одной группы (анодной или катодной) служит отдельное коммутирующее устройство.

Инверторы с общей коммутацией. Коммутирующее устройство является общим для всех вентильных плеч инвертора. В коммутирующем устройстве инвертора содержится один коммутирующий конденсатор.

Инверторы с межвентильной коммутацией. В таких инверторах запирающее каждого рабочего тиристора происходит при отпирании следующего по порядку работы тиристора другой фазы, но этой же группы.

Инверторы с межфазовой коммутацией. Коммутирующее устройство инвертора служит для попеременного запирающего двух тиристоры разных фаз.

По способу управления инверторы разделяются на *инверторы с самовозбуждением и с внешним (независимым) возбуждением.*

В инверторах с самовозбуждением управляющие импульсы, подаваемые на тиристоры, формируются из выходного напряжения инвертора. Частота выходного напряжения определяется параметрами нагрузки.

В инверторах с независимым возбуждением управляющие импульсы формируются внешним генератором, который и задает частоту выходного напряжения. Ввиду того что частота выходного напряжения не зависит от параметров нагрузки, данный тип инверторов получил наиболее широкое распространение в преобразовательной технике.

В зависимости от особенностей протекания электромагнитных процессов автономные инверторы можно разделить на три основных типа: инверторы тока (рис. 2.2, а); инверторы напряжения (рис. 2.2, в); резонансные инверторы (рис. 2.2, д).

Для инверторов тока характерно то, что они формируют в нагрузке ток ($i_{\text{вых}}$) а форма и фаза напряжения зависят от параметров нагрузки.

Источник постоянного тока работает в режиме генератора тока, для чего во входной цепи включается реактор L_d с большой индуктивностью. Кроме того, реактор L_d выполняет функции фильтра высших гармонических напряжения, так как к нему в любой момент времени прикладывается разность между неизменным напряжением источника питания и пульсирующим напряжением на входе инвертора; препятствует разряду конденсатора на

источник питания во время коммутации тока в тиристорах и обеспечивает апериодический режим работы инвертора, характерный малыми пульсациями входного тока. Следует отметить, что при питании инвертора от источников с характеристиками, близкими к источнику тока, дроссель L_d может отсутствовать.

Инвертор тока должен обеспечивать режим работы, при котором между анодом и катодом закрывшегося тиристора в течение некоторого времени поддерживается отрицательное напряжение, необходимое для восстановления запирающих свойств тиристора. Это время $t_{\text{выкл}}$ называется временем запирания (рис. 2.2, б).

При активно-индуктивном характере потребителя баланс реактивной мощности обеспечивается коммутирующими и компенсирующими конденсаторами. Конденсаторы по отношению к нагрузке могут быть включены параллельно, последовательно, последовательно-параллельно.

Для инверторов тока характерен энергообмен между коммутирующими и компенсирующими конденсаторами, включенными в цепи переменного тока, реактивностями цепи нагрузки и дросселем L_d в цепи входного тока.

В режиме холостого хода инвертор тока неработоспособен вследствие роста амплитуды обратных и прямых напряжений на тиристорах. При перегрузках его работа затруднена из-за недостаточного времени для восстановления запирающих свойств тиристоров. Инверторы тока имеют близкую к синусоидальной форму выходного напряжения, относительно малые пульсации входного тока, возможность реверса направления потока мощности без изменения направления тока (при переходе в выпрямительный режим). Внешняя характеристика инвертора тока мягкая.

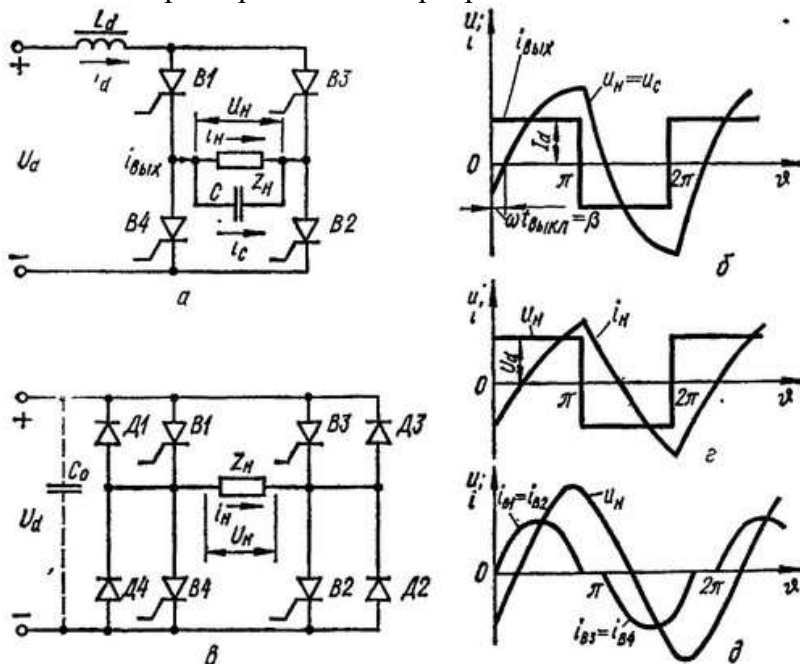


Рис. 2.2. Однофазная мостовая схема инвертора тока (а) и инвертора напряжения (в); временные диаграммы тока и напряжения на выходе инвертора тока (б), инвертора напряжения (г) и резонансного инвертора (д) при активно-индуктивной нагрузке

Инверторы напряжения формируют в нагрузке напряжение, а форма и фаза тока зависят от характера нагрузки. Источник питания инвертора напряжения работает в режиме генератора напряжения. Если инвертор питается от выпрямителя, то на его входе ставится конденсатор достаточно большой емкости для обеспечения проводимости источника постоянного напряжения в обратном направлении. Это необходимо, когда в составе нагрузки имеются реактивные элементы любого типа. Через обратный выпрямитель (Д1...Д4) осуществляется энергообмен между накопителями, имеющимися в

составе нагрузки, и источником питания или конденсатором C_0 , а в многофазных инверторах — также и энергообмен между фазами нагрузки. Конденсатор C_0 выполняет функции фильтра высших гармонических тока, так как по нему протекает разность между выходным и постоянным в пределах полупериодов входным током. Инвертор напряжения может работать в режиме холостого хода. Работоспособность инвертора напряжения в режиме, близком к короткому замыканию, определяется коммутационными свойствами полностью управляемых вентилях или принятым способом коммутации и параметрами коммутирующих элементов обычных тиристоров. Инверторы напряжения работоспособны, имеют малые изменения формы кривой и величины выходного напряжения при изменении выходной частоты в широких пределах. Коммутационные процессы в них мало влияют на форму кривой выходного напряжения, а установленная мощность коммутирующих элементов сравнительно небольшая. Внешняя характеристика инвертора напряжения жесткая.

Основными областями применения инверторов тока и инверторов напряжения являются: стабилизированные по выходным параметрам преобразователи частоты; вторичные источники питания переменным током; установки частотно-регулируемого электропривода.

В резонансных инверторах нагрузка, имеющая, как правило, значительную индуктивность, образует с реактивными элементами схемы инвертора колебательный контур с резонансом напряжений. Выключение тиристоров инвертора происходит благодаря плавному спадаанию до нуля анодного тока тиристора (тока колебательного контура) на каждом полупериоде (рис. 2.2, д). Собственная частота контура в резонансных инверторах должна быть выше или равна рабочей частоте инвертора. Конденсаторы, входящие в состав колебательного контура, могут быть включены последовательно с нагрузкой, параллельно ей или последовательно-параллельно, а дроссели — в цепи входного тока, в анодных цепях вентилях или последовательно с нагрузкой.

Для резонансных инверторов характерен интенсивный энергообмен между накопителями, входящими в состав схемы. Резонансные инверторы могут питаться от источников, работающих в режиме генератора э. д. с. или тока. Инверторы, питающиеся от генератора э. д. с., называются инверторами с открытым входом, а питающиеся от генератора тока — с закрытым входом.

Резонансные инверторы имеют близкую к синусоидальной форму напряжения и тока в нагрузке, плавное нарастание (в большинстве схем без обратных диодов) и спад тока через вентиля, что обеспечивает малые коммутационные потери мощности в последних. Данный тип инверторов целесообразно применять при повышенных частотах выходного напряжения (единицы кГц, десятки кГц).

Следует подчеркнуть, что конкретные схемы автономных инверторов зачастую обладают одновременно признаками разных классификационных групп в зависимости от соотношения параметров, режима работы и т. д.

Инверторы, ведомые сетью.

Ведомые инверторы (ВИ) работают на сеть, в которой есть другие источники электроэнергии. Коммутации вентилях в них осуществляются за счет энергии этой сети. Частота на выходе ВИ равна частоте сети, а напряжение — напряжению сети.

Принцип работы инвертора, ведомого сетью, можно рассмотреть на примере работы простейшего **однофазного инвертора**, приведенного на рис. 3, а. Цепь содержит источник постоянной инвертируемой э. д. с. U_d , последовательное которым включены тиристор V , дроссель L_d и выходной трансформатор Tr . Первичная обмотка Tr подключена к сети переменного тока, создающего на вторичной обмотке напряжение u_2 . По отношению к тиристорам V это напряжение периодически меняет знак, в одну часть периода складываясь

с напряжением U_d в другую — вычитаясь из него. По отношению к инвертируемому напряжению тиристор B всегда включен в проводящем направлении.

Энергия передается от инвертора в сеть переменного тока тогда, когда направления инвертированного тока i_B и переменного напряжения u_2 ; противоположны, т. е. когда u_2 и U_d встречны.

Процесс инвертирования возможен, если $U_{2m} > U_d$. Для инвертирования необходимо отпирать тиристор до момента O_1 , когда напряжение на аноде будет еще больше нуля. Это имеет место для всех углов управления $\alpha_T < \alpha < \alpha_0$, где α_T — граничный угол управления, при котором достигается предельный режим работы инвертора.

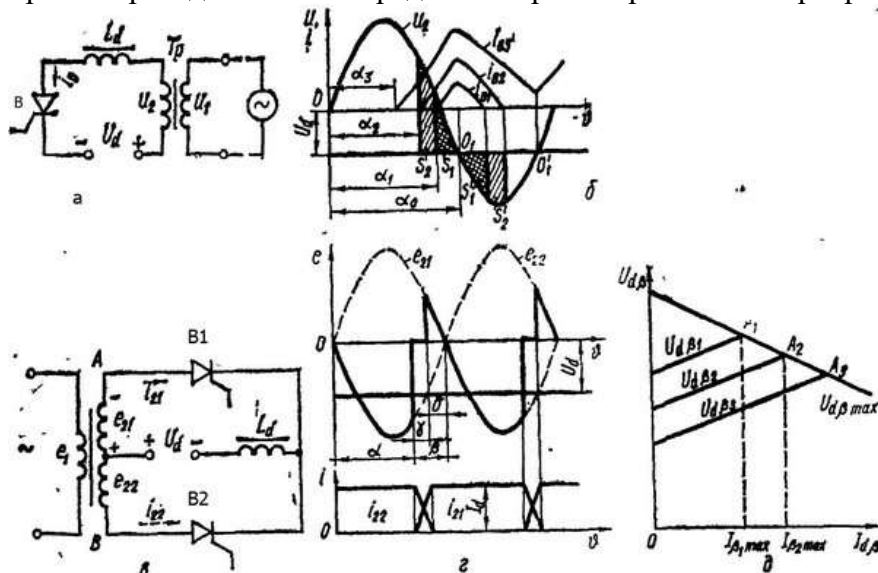


Рис. 3 Схемы однофазного (а) и двухфазного (в) инвертора, ведомого сетью; временные диаграммы токов и напряжений (б, г), семейство входных характеристики инвертора (д). Пренебрегая потерями в схеме, можно записать

$$U_d \pm u_2 = x_d \frac{di_B}{d\theta},$$

где x_d — реактивное сопротивление контура.

Из уравнения следует, что скорость изменения тока i_B будет прямо пропорциональна разности $U_d - u_2$.

Если $U_d \pm u_2 > 0$, $\frac{di_B}{d\theta} > 0$, ток i_B возрастает (рис. 3, б). При $U_d - u_2 = 0$ i_B достигает максимума, при $U_d - u_2 < 0$ i_B уменьшается и поддерживается за счет энергии, накопленной в индуктивности дросселя L_d . Продолжительность работы тиристора после точки O_1 определяется временем, в течение которого эта энергия будет рассеяна. Величина накопленной энергии пропорциональна площадям S_1 и S_2 , а рассеянной — S_1' и S_2' . Поэтому прерывание тока в цепи инвертора определится моментом, когда при заданном угле управления обе площади (S_1 и S_1' или S_2 и S_2') становятся равны между собой.

При изменении угла управления в сторону его уменьшения площадь S_1 будет все время возрастать. В соответствии с этим должна возрастать и площадь S_1' . Однако рост этой площади при указанных значениях U_{2m} и U_d ограничен участком синусоиды $O_1 \dots O_1'$. Как только будет израсходован весь резерв этой площади, тиристор, раз включившись, уже больше выключиться не сможет, и с точки O_1' его ток начнет снова возрастать под действием напряжения $U_d - u_2 > 0$, инвертор перейдет в режим короткого замыкания.

Точка O_1' , которая определяет границу устойчивой работы инвертора, называется граничной,

Потеря устойчивости инвертором (опрокидывание) в реальных инверторах наступает раньше, чем это определяется точкой O_1' , так как для восстановления запирающих свойств тиристора после его выключения необходим некоторый промежуток времени (δ) для рассасывания электрических зарядов в p - n -переходах. Следовательно, в реальной схеме инвертора тиристор должен выключаться раньше на угол δ , чем будет достигнута точка O_1' , причем это опережение должно всегда соответствовать наиболее тяжелому режиму работы тиристора, при котором $\delta = \delta_{\max}$.

Аналогичную картину можно получить и если $\alpha = \text{const}$, а $U_d = \text{var}$.

Рассмотренная схема содержит те же элементы, что и управляемый выпрямитель, работающий на против-э. д. с. Однако роль против-э. д. с. в инверторном режиме выполняет не U_d , а напряжение сети переменного тока. Для того чтобы это могло иметь место, необходимо при переходе от выпрямительного режима к инверторному изменить знак U_d и увеличить угол управления за пределы граничного.

Соотношения между основными параметрами схемы при этом не изменяются, и, следовательно, рабочий режим инвертора будет описываться теми же уравнениями, что и рабочий режим управляемого выпрямителя, с той разницей, что источник U_d выступает в этом случае не как потребитель, а как генератор активной мощности. За счет этого источника и покрываются все потери в инверторе. Таким образом, обозначив собственную э. д. с. инвертора в режиме холостого хода через U_d получим:

$$U_d = U_{d0} + \Delta U_x + \Delta U_a.$$

где ΔU_x и ΔU_a — реактивные и активные потери напряжения.

В инверторе, ведомом сетью, $\Delta U_x \gg \Delta U_a$. Простейший однофазный инвертор, ведомый сетью, характеризуется весьма низкими энергетическими показателями из-за плохого использования выходного трансформатора и значительного искажения формы токов как на стороне переменного, так и на стороне постоянного напряжений. По этой причине инверторы, ведомые сетью, как правило, выполняются многофазными.

На рис. 3, в, г представлены *двухфазная схема инвертора* и временные диаграммы токов и напряжений, поясняющие его работу.

Выбор требуемых участков рабочего напряжения, при которых обеспечивается поочередный пропуск тока тиристорами $B1$ и $B2$ в пределах каждого из периодов переменного напряжения, достигается выбором момента отпираания тиристорov при помощи импульсов управления. При подаче импульса управления на тиристор $B1$ незадолго до того, как напряжение на фазе A становится отрицательным, этот тиристор отпирается и пропускает ток преимущественно при отрицательном напряжении фазы A .

Встречное направление отрицательного напряжения e_{21} по отношению к анодному току i_{21} свидетельствует о приеме данной фазой мощности от источника постоянного тока. Эта мощность в процессе трансформации тока передается через вторичную и первичную обмотки трансформатора в сеть однофазного тока. Такая же передача мощности происходит в следующий полупериод через фазу B вторичной обмотки, когда через нее и тиристор $B2$ протекает ток.

Переход (коммутация) тока с тиристора $B1$ на тиристор $B2$ происходит так же, как и при выпрямительном режиме, в течение некоторого промежутка времени, называемого углом коммутации γ .

Роль тиристорov при инвертировании тока сводится к роли переключателей, попеременно замыкающих цепь источника постоянного тока на одну из вторичных обмоток, а именно на ту, которая обеспечивает в данную часть периода наиболее отрицательное напряжение. Для того чтобы имела место естественная коммутация тока, характеризующаяся переходом тока

от одного тиристора к другому, отпирание очередного тиристора должно происходить с некоторым опережением против начала отрицательного полупериода. Это опережение в угловом измерении носит название угла опережения β .

Угол опережения должен быть достаточен не только для того, чтобы могла совершиться естественная коммутация токов тиристорov (угол γ), но и для того, чтобы после коммутации токов оставался до появления положительного напряжения достаточный по величине угол δ , в течение которого закончивший свою работу тиристор должен успеть восстановить свои запирающие свойства.

Если послекоммутационный угол δ меньше, чем требуется для восстановления запирающих свойств тиристора, то с появлением положительного напряжения на аноде тиристора, закончившего работу, он вновь отпирается, и ток продолжает протекать при положительном полупериоде переменного напряжения, что приводит к опрокидыванию инвертора.

Таким образом, для нормальной работы инвертора необходимо, чтобы

$$\beta \geq \gamma + \omega t_{\text{восс}},$$

или

$$\beta - \gamma = \delta \geq \omega t_{\text{восс}},$$

где β — угол опережения (управления), отсчитываемый от точки пересечения фазовых напряжений в сторону опережения; $t_{\text{восс}}$ — время восстановления управляющих свойств тиристора.

Соотношение между токами и напряжениями для ведомого инвертора можно получить из соотношений для аналогичной схемы управляемого выпрямителя, в которых вместо α подставлено значение $(\pi - \beta)$.

Выражение для расчета тока инвертора имеет вид:

$$I_{d\beta} = \frac{\sqrt{2}E_2}{x_a} \sin \frac{\pi}{m_2} [\cos(\beta - \gamma) - \cos \beta]$$

Среднее значение входного напряжения инвертора (собственная противо-э. д. с.) суммируется из напряжения холостого хода и приращения напряжения в период коммутации:

$$U_{d\beta} = U_{d\beta_0} + \Delta U_x.$$

Напряжение холостого хода определяется выражением:

$$U_{d\beta_0} = \sqrt{2}E_2 \frac{\sin \frac{\pi}{m_2}}{\frac{\pi}{m_2}} \cos \beta. \quad (1)$$

Приращение напряжения, обусловленное явлением коммутации, равно:

$$\Delta U_x = \sqrt{2}E_2 \frac{\sin \frac{\pi}{m_2}}{\frac{\pi}{m_2}} \left[\frac{\cos(\beta - \gamma) - \cos \beta}{2} \right],$$

или в функции входного тока

$$\Delta U_x = \frac{m_2 x_a}{2\pi} I_{d\beta} \quad (2)$$

Из выражения (1) и (2) получаем выражение входной характеристики инвертора:

$$U_{d\beta} = \sqrt{2} E_2 \frac{m_2}{\pi} \sin \frac{\pi}{m_2} \cos \beta + \frac{m_2 x_a}{2\pi} I_{d\beta} = U_{d\beta 0} + \frac{m_2 x_a}{2\pi} I_{d\beta} \quad (3)$$

Из выражения (3) видно, что в отличие от внешней характеристики выпрямителя, где второе слагаемое определяет ее спад с ростом тока, у инвертора второе слагаемое определяет подъем входной характеристики. Повышение входного напряжения $U_{d\beta}$ с ростом входного тока $I_{d\beta}$ объясняется добавлением коммутационной площадки к синусоидальному выходному напряжению холостого хода.

На рис. 3, д) приведено семейство входных характеристик инвертора. Начальные точки на оси ординат соответствуют напряжению Холостого хода. Верхнее ограничение характеристик определяется величинами токов, при которых послекоммутационный угол δ при заданном угле β становится δ_{\min} , т. е. углом, достаточным для надежного восстановления запирающих свойств тиристоров ($\delta_{\min} \geq 3\delta_0 \geq 3\omega t_{\text{осс}}$). Точки A_1, A_2, A_3 на входных характеристиках соответствуют предельным токам нагрузки $I_{d\beta\max}$ и предельным напряжениям $U_{d\beta\max}$. Определяя ограничительную характеристику инвертора.

Характерные особенности инверторного режима следующие:

- а) инвертор может быть построен только на управляемых вентилях, так как большую часть нерабочего интервала к ним приложено положительное напряжение;
- б) угол отпирания α должен превышать 90° ;
- в) полярность напряжения на стороне постоянного тока противоположна полярности выпрямителей;
- г) во всем диапазоне изменения тока нагрузки и входного напряжения должно быть выполнено следующее условие: $\delta > \gamma + \delta_{\min}$.

Контрольные вопросы:

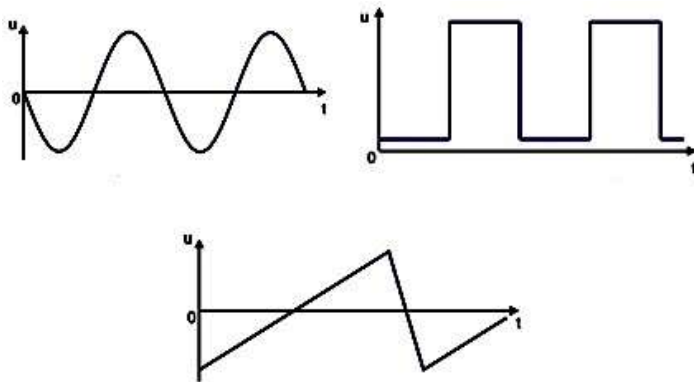
1. Тиристорные инверторы
2. Автономные инверторы и преобразователи частоты
3. Инверторы, ведомые сетью.
4. Характерные особенности инверторного режима

Раздел 4. Генераторы импульсные устройства

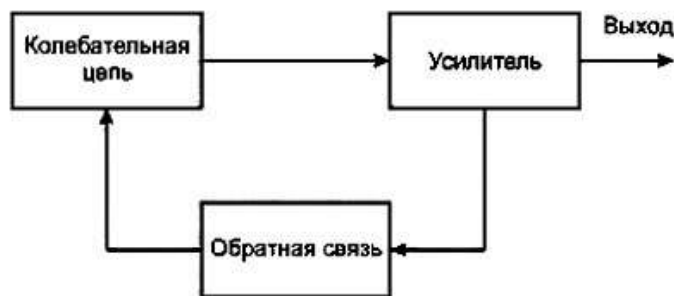
Тема 17. Классификация генераторов. Основные параметры.

Устройства, преобразующие электроэнергию источника постоянного тока в незатухающую энергию электрических колебаний расчетной частоты и формы, называются электронные генераторы.

Такие генераторы приобрели популярность в электронике, компьютерной технике, радиоприемниках. Генераторами может выдаваться сигнал частотой до нескольких мегагерц. Форма выходного напряжения имеет формы синусоиды, прямоугольника и пилы.



Контур колебаний получает возбуждение от наружного источника тока, появляются колебания, которые со временем затухают, так как сопротивление поглощает энергию. Чтобы колебания не затухали, в контуре нужно восполнять потерю энергии. Этот процесс восполнения выполняется положительной обратной связью. Эта связь подает в контур некоторую часть сигнала, который должен совпадать с сигналом обратной связи.



Электронные генераторы состоят из следующих частей:

- Контур колебаний, задающий частоту генератора.
- Усилитель, повышающий амплитуду сигнала на выходе контура колебаний.
- Обратная связь, подающая некоторое количество энергии в контур.

Электронные генераторы используют постоянный ток для образования колебаний переменного тока, и являются схемами с положительной связью.

Классификация

Электронные генераторы делятся на несколько классов по различным параметрам. Рассмотрим основные разновидности таких генераторов.

По форме сигнала:

- В виде синусоиды.
- Прямоугольные.
- В форме пилы.
- Специальные.

По частоте:

- Высокочастотные (более 100 кГц).
- Низкочастотные (менее 100 кГц).

По возбуждению:

- С независимым возбуждением.
- Автогенераторы (самовозбуждение).

Автоматическим генератором называют устройство, которое самостоятельно возбуждается, без воздействия извне, преобразует поступающую энергию в колебания. Электронные генераторы выполняются по схемам, аналогичным усилителям, за исключением отсутствия питания сигнала входа. Вместо него используют обратную связь, которая является передачей некоторого количества сигнала выхода на вход.

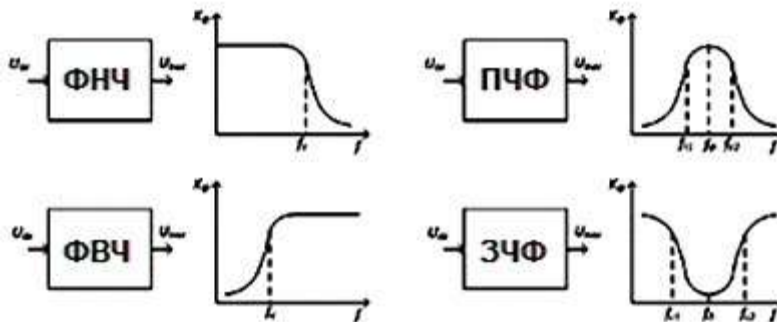
Определенная форма сигнала создается обратной связью. Частота колебаний создается на цепях RC или LC, и зависит от времени зарядки емкости. Сигнал обратной связи приходит на вход усилителя, где повышается в несколько раз и выходит. Часть сигнала возвращается и ослабевает в несколько раз, что дает возможность поддерживать одинаковую амплитуду сигнала на выходе.

Генераторы с внешним видом возбуждения считаются усилителями мощности с определенным частотным интервалом. На его вход подается сигнал от автогенератора, усиливается определенный интервал частот.

Электронные генераторы RC

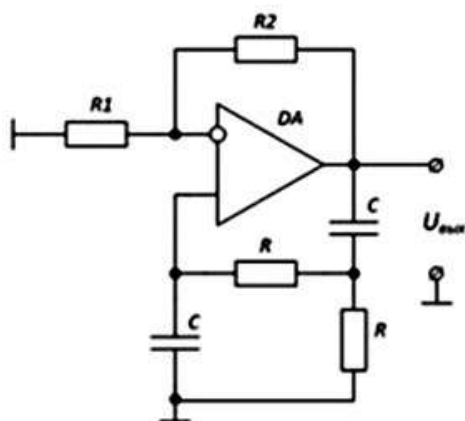
Для образования низкочастотных генераторов применяют усилители. В них вместо обратной связи монтируют RC цепи для создания некоторой частоты колебаний. Эти цепи являются фильтрами частоты, которые пропускают сигналы в специальном интервале частот и не пропускают за его пределами. По обратной связи возвращается некоторая полоса частот.

Типы фильтров



- Низкочастотные фильтры.
- Высокочастотные фильтры.
- Полосовые фильтры.
- Заграждающие фильтры.

Характеристикой фильтра является частота среза. Если взять положение ниже этой частоты, или выше, то сигнал значительно уменьшается. Заграждающие и полосовые фильтры имеют характеристику в виде ширины полосы.



На рисунке изображена цепь генератора с синусоидальным сигналом. Усиление определяется цепью обратной связи $R1, R2$. Для создания нулевого сдвига по фазе обратная связь подключена от выхода усилителя на неинвертирующий его вход. Цепь обратной связи выступает в качестве полосового фильтра.

Для стабилизации величины частоты пользуются кварцевыми резонаторами, которые состоят из минеральной тонкой пластины, закрепленной в держателе. Кварц славится своим пьезоэффектом. Это дает возможность применять его в качестве системы, аналогичной колебательному контуру со свойством резонанса. Частота резонанса пластин колеблется от единиц до тысяч мегагерц.

Мультивибраторы

Эти электронные генераторы создают колебания формы прямоугольника, являются 2-х каскадным усилителем с обратной связью на основе резисторов. Выходы каскадов соединены со входами. Название этого генератора объясняет наличие значительного количества гармоник.

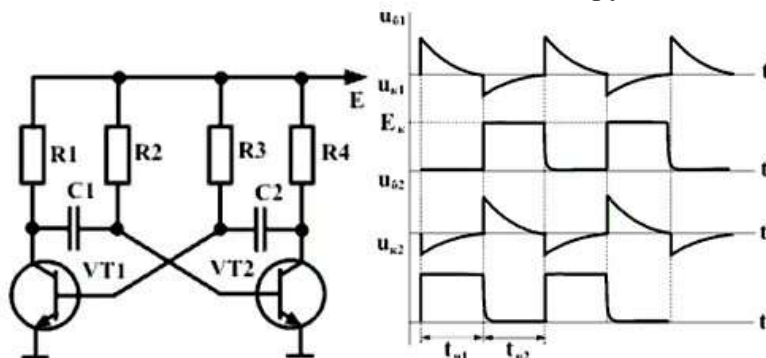
Мультивибратор способен действовать в нескольких режимах:

- Автоколебательный режим.
- Синхронизация.
- Ждущий режим.

В первом виде режима мультивибратор работает с самовозбуждением. При синхронизации на генератор оказывает воздействие внешнее напряжение с частотой импульсов. Ждущий режим подразумевает работу с внешним возбуждением.

Автоколебательный режим мультивибратора

Устройство мультивибратора включает в себя два каскада усилителя с резисторами. Выходы каскадов подключены ко входам других каскадов через емкости $C1$ и $C2$.

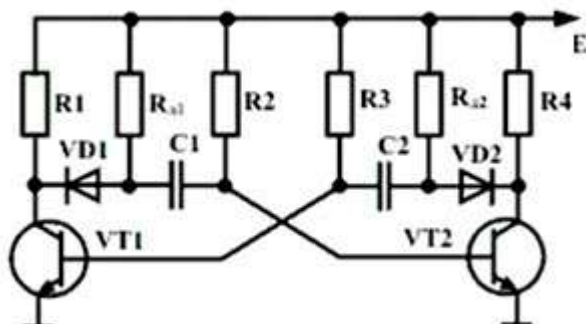


Мультивибраторы с аналогичными транзисторами и симметричными компонентами имеют название симметричных.

В режиме автоколебаний мультивибратор может находиться в 2-х состояниях равновесия:

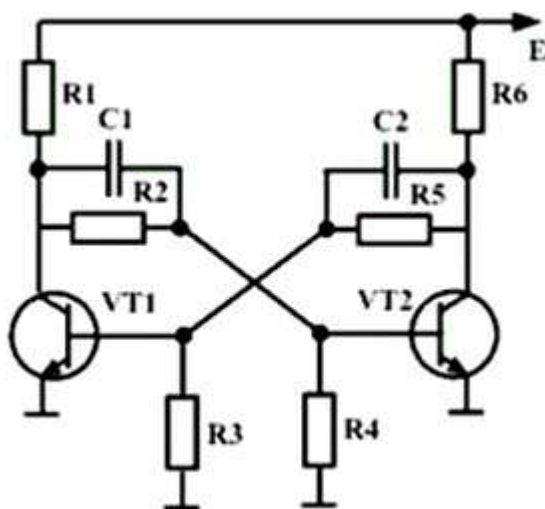
1. Один транзистор в насыщении, второй в отсечке.
2. Первый транзистор на отсечке, другой в насыщении.

Такие положения неустойчивы. Одна схема переходит в другую с эффектом лавины с помощью обратной связи. Для оптимизации формы импульсов на выходе генератора подключают разделительные диоды в схемы коллекторов. Через диоды подключают вспомогательные резисторы.



По такой схеме после закрытия одного транзистора и уменьшения потенциала коллектора диод тоже закрывается. При этом он отключает конденсатор от цепи. Конденсатор заряжается через вспомогательный резистор. Наибольшая длина импульсов определяется параметрами частоты транзисторов.

Такой тип схемы дает возможность создать импульсы практически прямоугольной формы. В качестве недостатков можно отметить малую скважность и невозможность плавного регулирования периода колебаний.

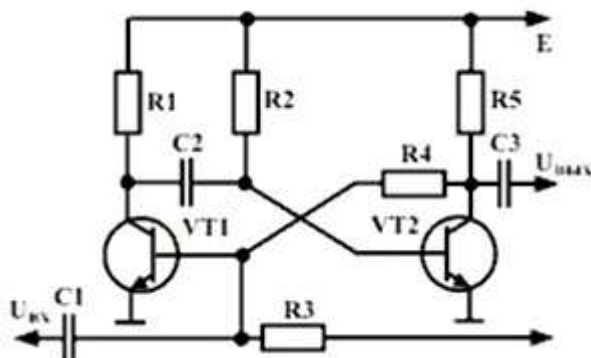


По такой схеме резисторы R2 и R5 включены параллельно емкостям C1 и C2. Резисторы R(1, 3, 4, 6) создают делители напряжения, которые стабилизируют потенциал базы транзистора. При коммутации мультивибратора ток базы резко меняется. Это уменьшает время снижения зарядов в базе и увеличивает скорость выхода транзистора из насыщения.

Ждущий мультивибратор (одиночный)

Если мультивибратор действует в режиме автоколебаний и не имеет устойчивости, то его можно преобразовать в генератор с одной устойчивой позицией и одной неустойчивой позицией. Такие цепи имеют название одновибраторов (релаксационных реле). Чтобы перевести схему из одного состояния в другое, необходимо воздействие внешнего импульса.

В неустойчивой позиции цепь находится некоторое время, зависящее от ее параметров. Далее она скачкообразно возвращается в устойчивую позицию. Чтобы получить ждущий режим генератора, необходимо собрать следующую схему:



В исходном положении транзистор VT1 находится в закрытом виде. При поступлении на вход плюсового импульса по транзистору идет ток коллектора. При изменении разности потенциалов на транзисторе VT1 оно подается через емкость C2 на базу VT2. С помощью обратной связи повышается лавинный эффект, который приводит к закрытию VT2 и открытию VT1.

В такой неустойчивой позиции схема находится до полного разряда емкости C2. Далее транзистор VT2 открывается, VT1 закрывается. Положение схемы возвращается в первоначальную позицию.

Похожие темы:

- Инверторные генераторы. Принцип действия и особенности
- Термогенераторы. Устройство и принцип действия. Особенности и применение
- Пьезогенераторы. Устройство и принцип действия. Применения и особенности
- Наногенераторы. Устройство и принцип действия, виды и особенности

Контрольные вопросы:

1. Электронные генераторы состоят из следующих частей
2. Электронные генераторы это
3. Классификация
4. Электронные генераторы RC

Тема 18. Понятия об импульсах, формирователях импульсов

Генератор импульсов – неотъемлемая часть любой цифровой схемы. Его назначение – создать импульсную последовательность с заданным периодом, длительностью импульсов и амплитудой. Генератор может быть построен на логических элементах НЕ, И-НЕ или ИЛИ-НЕ. Рассмотрим простейшую схему генератора на двух логических

элементах И-НЕ. Элементы И-НЕ (а не просто НЕ) выбраны с целью осуществления управлением режимом генерации внешним сигналом (рис. 5.1. 14).

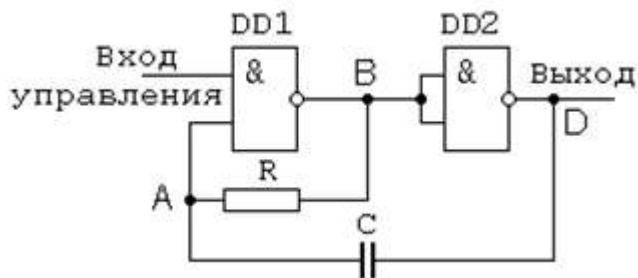


Рис. 5.1 14. Схема генератора импульсов на элементах И-НЕ

При подаче на вход управления уровня логического 0 генератор заторможен, т.е. его работа запрещена. Это объясняется тем, что любой ноль на входе элемента И-НЕ однозначно определяет состояние выхода этого элемента и никакие изменения невозможны. В точке В (рис. 14) схемы уровень логической 1, а в точке D – 0. Если же на вход управления подать уровень логической единицы, то состояние выхода первого элемента (точка В) будет определяться уровнем напряжения в точке А. Напряжение же в точке А определяется процессами заряда и разряда конденсатора С через резистор R. Логический элемент DD1 при этих условиях выполняет функцию НЕ.

Предположим, что напряжение в точке В соответствует уровню логического 0. Тогда в точке D – уровень логической 1. Будем для определенности считать, что напряжение логического 0 равно 0 В, а логической единицы – 3,5 В. Тогда можно рассмотреть упрощенные схемы (без логических элементов), представленные на рис. 15. Если считать, что конденсатор разряжен, то напряжение в начальный момент времени в точке А равно напряжению в точке D (рис. 15а).

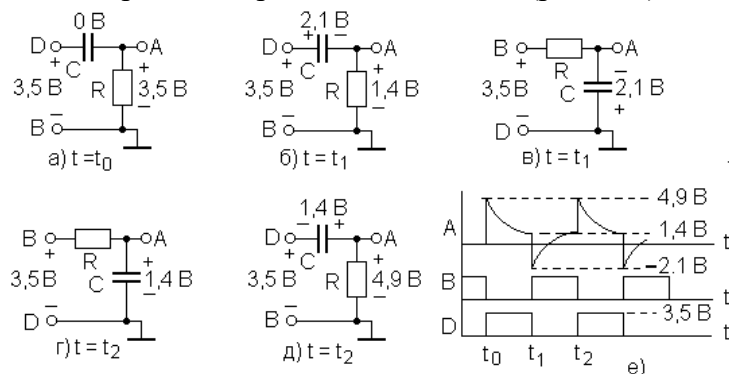


Рис. 5.2. 15.1 Эквивалентные схемы генератора в различные моменты времени и диаграммы напряжений

Это связано с инерционностью конденсатора: его заряд не может измениться мгновенно. Напряжение на конденсаторе определяется известной формулой $UC = q / C$, где q – заряд конденсатора, C – его емкость. Если заряд изменяется во времени, а так оно и будет по мере заряда конденсатора, то эта формула выглядит так:

$$U_c = \frac{1}{C} \int_0^t i \cdot dt$$

При $t=0$ интеграл равен 0 и $UC = 0$.

Итак, в момент времени $t_0 = 0$ на обоих входах элемента DD1 уровень логической единицы, что и определяет ноль в точке В. С течением времени конденсатор С

заряжается через резистор R, напряжение на конденсаторе увеличивается, а на резисторе уменьшается и стремится к уровню логического 0 (см. рис. 15е – моменты времени от t_0 до t_1). При напряжении переключения элемента (1,4 В) в момент времени t_1 (рис. 15б) конденсатор зарядится до $(3,5 - 1,4) = 2,1$ В.

На рис. 15в отражен тот же момент времени t_1 после переключения элемента. Теперь в точке А напряжение отрицательно, что соответствует уровню логического 0. Начинается процесс перезаряда конденсатора (моменты времени $t_1 - t_2$ на диаграммах напряжений). К моменту времени t_2 конденсатор зарядится до напряжения переключения логического элемента (1,4 В) (рис. 15г), элемент переключится (рис. 15д), а напряжение в точке А равно сумме напряжения в точке D (3,5 В) и напряжения на заряженном конденсаторе (1,4 В). Далее процесс повторяется с той же периодичностью и на выходе генератора (точка D) появится периодическая последовательность импульсов. Период следования импульсов определяется временем заряда и разряда конденсатора С через резистор R и пропорционален RC ($T \sim RC$). Для схем ТТЛ серии 155 величина сопротивления резистора не должна превышать 1,5 кОм, а емкость конденсатора может варьироваться в широких пределах, обеспечивая период колебаний от десятков секунд до десятых долей микросекунды. Ограничение на величину резистора R связано с тем, что при большем чем 1,5 кОм сопротивлении логический элемент DD1 не будет переключаться из нулевого состояния в единичное и генерация прекратится.

Формирователи импульсов предназначены для создания импульсов в нужный момент времени и заданной заранее длительности. Очень часто возникает задача формирования короткого импульса по фронту или срезу другого сигнала любой длительности. Одна из схем такого формирователя по фронту входного сигнала с диаграммами напряжений представлена на рис.5.2 16. В схеме используется 4 логических элемента И-НЕ, причем первые три выполняют функцию НЕ, так как входы элементов соединены вместе (один вход можно подключить к шине с уровнем логической 1 или оставить свободным). Это сделано для того, чтобы использовать один корпус интегральной микросхемы (например, К155ЛА3), внутри которой имеется 4 логических элемента И-НЕ.

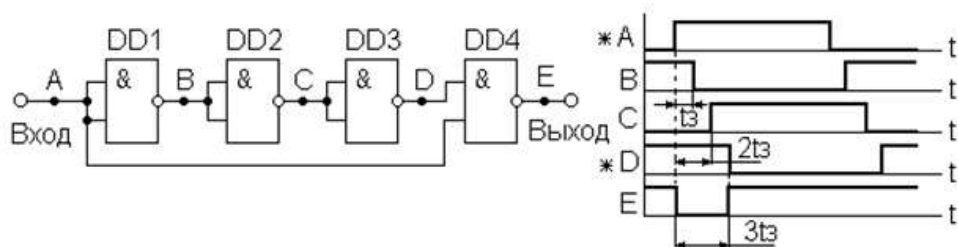


Рис.5.3 16. Схема формирователя импульсов по фронту входного сигнала и диаграммы напряжений

Анализ этой схемы можно проводить только с помощью диаграмм напряжений с учетом того, что сигнал появляется на выходе логического элемента не мгновенно, а с некоторой задержкой (t_z). Если задержки не учитывать и рассматривать только

уровни напряжений во всех точках схемы, то при любом логическом уровне на входе на выходе всегда будет логическая 1. Логические элементы DD1, DD2 и DD3 инвертируют сигнал, который появляется на соответствующем выходе с задержкой $t_{з}$. Это и отражено на диаграммах напряжений для точек В, С и D. На входы элемента DD4 действуют 2 сигнала А и D (на рис. 16 они помечены звездочками). Вспоминая логику элемента И-НЕ (табл. 2), замечаем, что только при одновременном появлении уровней логической 1 на входах А и D, на выходе появится уровень логического 0, а если хотя бы на одном входе – 0, на выходе единица. Из диаграмм видно, что совпадение двух единичных сигналов происходит в моменты времени, связанные с задержкой сигнала, проходящего по трем элементам от точки А до точки D. Сигнал на выходе имеет длительность $3t_{з}$. С помощью этой схемы можно не только формировать импульсы по фронту входного сигнала, но и определять время задержки распространения сигнала через логический элемент, измеряя длительность выходного импульса с помощью электронного осциллографа.

Одна из схем формирования импульсов заданной длительности приведена на рис.5.3 17. Эта схема получила название одновибратор или ждущий мультивибратор, На вход схемы подается сигнал произвольной длительности, запускающий процесс формирования выходного импульса, возникающего по фронту входного сигнала, с длительностью, заданной разработчиком. Схема построена на однотипных элементах И-НЕ, хотя только один элемент (DD2) выполняет функцию И-НЕ. Все остальные элементы выполняют функцию НЕ. Прежде чем анализировать эту схему, необходимо выяснить начальные уровни напряжений во всех точках схемы и возможность запуска схемы.

В начальный момент времени (до подачи входного импульса запуска схемы) $A = 0$, $B = 1$ (см. диаграммы на рис. 17). Для того, чтобы информация в точке В воспринималась элементом DD2, необходимо в точке F обеспечить уровень логической 1. Это можно достичь, выбирая величину сопротивления резистора R меньше 1,5 кОм.

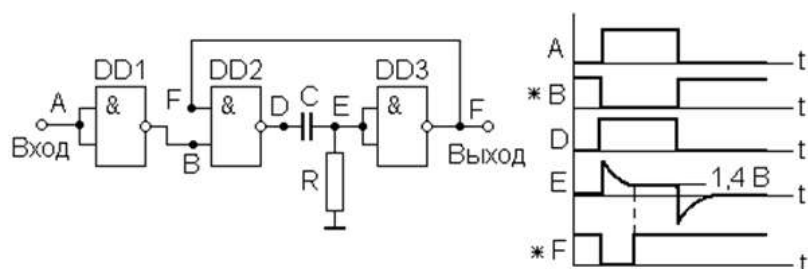


Рис.5.4 17. Схема одновибратора и диаграммы напряжений

Если это условие выполнено, то в точке D уровень 0, и в точке E также 0. Конденсатор С разряжен. При подаче на вход схемы запускающего положительного импульса, в точке В появится импульс, инверсный входному. В точке D напряжение скачком увеличится до уровня логической 1. Аналогичный скачок произойдет в точке E, так как конденсатор не может зарядиться мгновенно. Напряжение в точке F примет значение 0. Теперь на входах элемента DD2 логические нули, и на выходе D будет удерживаться высокий уровень, пока на обоих входах DD2 не установятся уровни 1. Т.е. в точке D будет поддерживаться единица в течение действия на входы элемента DD2 наиболее длинного из двух отрицательных импульсов (помечены звездочками на диаграммах напряжений на рис. 17).

Напряжение в точке Е зависит от процесса заряда конденсатора С через резистор R. По мере заряда конденсатора, напряжение на нем растет, а на резисторе, т.е. в точке Е, уменьшается. Как только это напряжение уменьшится до уровня переключения логического элемента (1,4 В), на выходе DD3 появится уровень 1. Выходной импульс сформирован. Его длительность определяется постоянной времени RC - цепи и пропорциональна произведению R и C, т.е. определяется разработчиком схемы. Повторный запуск схемы возможен только после окончания входного импульса и разряда конденсатора.

Вопросы для самопроверки

- 5.1. Начертите схему генератора импульсов на логических элементах и объясните его работу с помощью диаграмм напряжений и эквивалентных схем.
- 5.2. Возможно ли в схеме генератора на рис. 14 использовать другие логические элементы (не И-НЕ). Какие это могут быть элементы?
- 5.3. Возможно ли и как преобразовать схему генератора, чтобы использовалось 3 логических элемента (вместо двух)?
- 5.4. Объясните как формируется импульс на выходе схемы рис. 16?
- 5.5. Проанализируйте схему, в которой вместо элементов И-НЕ (рис. 16) установлены элементы ИЛИ-НЕ.
- 5.6. Проанализируйте схему, в которой вместо последнего элемента И-НЕ (рис. 16) установлен элемент ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ.
- 5.7. Возможно ли в схеме рис. 16 использовать все элементы ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ? Как соединять их входы?
- 5.8. Начертите схему формирователя импульсов заданной длительности и расставьте логические уровни на всех входах и выходах элементов до подачи импульса запуска.
- 5.9. Каковы условия работоспособности схемы на рис. 17?
- 5.10. Начертите диаграммы напряжений для формирователя импульсов (рис. 17) при подаче на вход двух коротких импульсов с промежутком между ними меньше длительности выходного сигнала, получаемого при одном запускающем импульсе.

Контрольные вопросы

1. Параллельный регистр
2. последовательный регистр
3. хранение данных в регистрах

Тема 19. Мультивибраторы, одновибраторы

Мультивибратор — это релаксационный (т.е. использующий положительную обратную связь) генератор прямоугольных импульсов. Он преобразует энергию источника питания в энергию выходных сигналов. Мультивибратор обладает свойством самовозбуждения. Простейшая схема мультивибратора, представленная на рис. 4.16, содержит два транзисторных ключа с симметричными коллекторно-базовыми обратными связями через конденсаторы. Базовые резисторы обеспечивают надежное открывание ключа:

$$R_{\bar{c}} = \beta \cdot R_x \cdot S$$

где S — коэффициент запаса по насыщению.

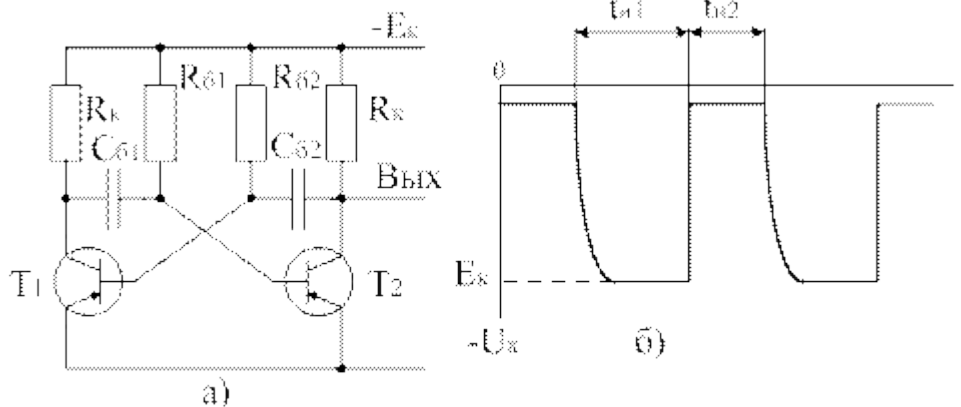


Рис.4.16. Симметричный мультивибратор на биполярных транзисторах: а- схема; б- форма выходного сигнала.

Амплитуда выходного сигнала ненагруженного мультивибратора близка к напряжению питания

$$U_{\text{вых}} = E_k - I_{\text{к0}} \cdot R_x \approx E_k$$

Длительности генерируемых импульсов определяются постоянной времени перезаряда конденсатора через базовый резистор:

$$t_{U1} = R_{\bar{c}1} \cdot C_{\bar{c}1} \cdot \ln 2 \approx 0,7 \cdot R_{\bar{c}1} \cdot C_{\bar{c}1}$$

$$t_{U2} = R_{\bar{c}2} \cdot C_{\bar{c}2} \cdot \ln 2 \approx 0,7 \cdot R_{\bar{c}2} \cdot C_{\bar{c}2}$$

При $C_{\bar{c}1} = C_{\bar{c}2} = C$ и $R_{\bar{c}1} = R_{\bar{c}2} = R$ длительность импульса $t_{U1} = t_{U2} = t_U = 0,7 \cdot R \cdot C$, а периода колебаний $T = 2 \cdot t_U = 1,4 \cdot R \cdot C$.

Скважность колебаний (при разных t_{U1} и t_{U2}) ограничивается временем полного заряда конденсатора. При использовании транзисторов с коэффициентом усиления по току $b = 30$ можно получить значение скважности не более 10.

Для того, чтобы мультивибратор начнет генерировать сразу при включении питания, должен быть мягкий режим самовозбуждения с минимальным запасом по насыщению.

При глубоком насыщении возникает жесткое самовозбуждение, требующее внешнего воздействия для начала генерации. Без этого воздействия оба транзистора оказываются в открытом состоянии.

Обычно используются мультивибраторы с $S = 2-3$. Меньшие значения S ухудшат прямоугольность выходного сигнала, а большие приведут к срыву генерации.

Для улучшения формы генерируемых импульсов используют специальные схемы.

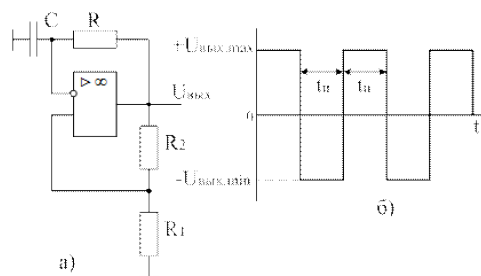


Рис.4.17. Симметричный мультивибратор на ОУ:
а- схема; б- осциллограмма выходного сигнала.

Симметричный мультивибратор на операционном усилителе показан на рис. 4.17. Он выполняется на базе инвертирующего триггера Шмитта, в котором отрицательная обратная связь включается через фильтр низкой частоты в виде RC-цепи. Длительность генерируемого импульса

$$t_{\text{п}} = \tau \cdot \ln(1 + 2 \cdot R_1 / R_2)$$

$$\tau = R \cdot C$$

Соответственно, частота генерации:

$$f = \frac{1}{2 \cdot t_{\text{п}}}$$

При $R_1 = R_2$ частота генерации $f = 1 / (2,2 \cdot R \cdot C)$.

Одновибратор — это схема с одним устойчивым состоянием и одним неустойчивым состоянием. Переход во второе состояние происходит под воздействием внешнего сигнала — запускающим импульсом. Время нахождения в этом состоянии зависит от параметров схемы и не зависит от длительности входного импульса.

Таким образом, одновибратор является формирователем прямоугольного импульса заданной длительности.

Быстродействие одновибратора определяется временем восстановления, после истечения которого устройство готово к приему следующего импульса.

В случае реализации на транзисторах, одновибратор выполняется по схеме эмиттерной связи — рис. 4.18.

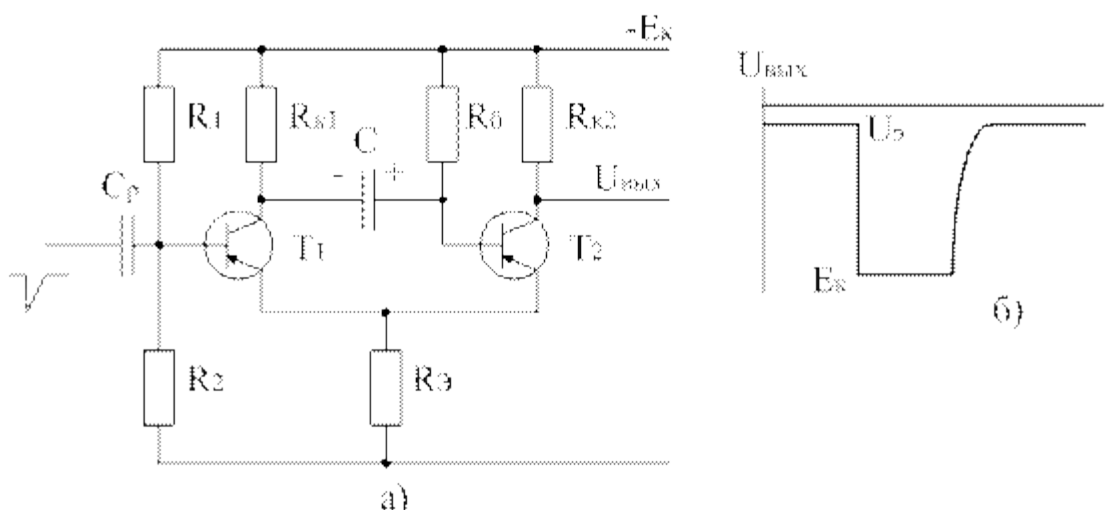


Рис.4.18. Одновибратор на транзисторах с эмиттерной связью:
а- схема; б- осциллограмма выходного сигнала.

В исходном состоянии транзистор T_2 насыщен, а T_1 — заперт напряжением автоматического смещения, выделяемым на транзисторе R, от прохождения тока $I_{к2}$. Длительность входного импульса

$$t_{\text{вх}} = C \cdot R_{\text{в}} \cdot \ln 2 \approx 0,7 \cdot C \cdot R_{\text{в}}$$

Одновибратор можно запустить путем подачи отрицательного (открывающего) импульса на базу закрытого транзистора T_1 или положительного (запирающего) импульса на базу открытого транзистора T_2 . Полярность указана применительно к использованному в схеме по рис. 4.18 транзисторам р-п-р типа. Следует иметь в виду, что выходное напряжение такого одновибратора содержит значительную потенциальную помеху, равную величине $U_{\text{с2}}$ падения напряжения на резисторе R_3 от тока $I_{\text{с2}}$.

Амплитуда импульса на выходе одновибратора:

$$U_{\text{ампл.вых}} = \frac{E_{\text{к}} \cdot R_{\text{к2}}}{R_{\text{к2}} + R_3}$$

Контрольные вопросы:

1. Мультивибратор
2. Сквозность колебаний
3. Одновибратор

Тема 20. Триггеры. Триггеры на микросхемах

В цифровых автоматах значение функции зависит не только от значения переменных в данный момент времени (данный такт), но и от их последовательности в предыдущие моменты (такты). Поэтому раздел алгебры логики, описывающий работу цифровых автоматов, обладающих памятью, называется последовательностной логикой. Основным элементом последовательностной логики является триггерный элемент или просто триггер. Триггером называется устройство, обладающее двумя состояниями устойчивого равновесия и способное под воздействием внешнего управляющего сигнала переходить скачком из одного состояния в другое.

Основные области применения триггера:

запоминающая ячейка в устройствах электронной памяти ЭВМ;
элемент деления на 2 в импульсных счетчиках и делителях частоты;
устройство для расширения (увеличения длительности) импульсов;
устройство, восстанавливающее форму прямоугольного импульса.

Классификация триггеров по способу организации логических связей:

триггеры с раздельным запуском или триггеры с установочными входами – RS-триггеры;
триггеры со счетным входом Т-триггеры;

Триггеры с приемом информации по одному входу – D-триггеры;

Универсальные триггеры – JK-триггеры.

По способу записи информации триггеры делят на асинхронные и синхронизируемые (тактируемые). В асинхронных триггерах информация, записанная в триггер, может изменяться в любой момент времени при изменении входных сигналов. В синхронизируемых

триггерах информация на выходе может меняться только в определенные моменты времени, задаваемые дополнительным синхронизирующим сигналом.

Как правило, триггер имеет два выхода: прямой Q и инверсный \bar{Q} . Состояние триггера определяется по прямому выходу Q . Число входов зависит от выполняемых функций:

S – вход установки триггера в единичное состояние;

R – вход установки триггера в нулевое состояние;

T – счетный вход;

D – вход приема информации;

C – вход синхронизации;

J, K – логические входы;

V – вход разрешения / запрета работы триггера.

Условные обозначения триггеров приведены на рис.4.1.

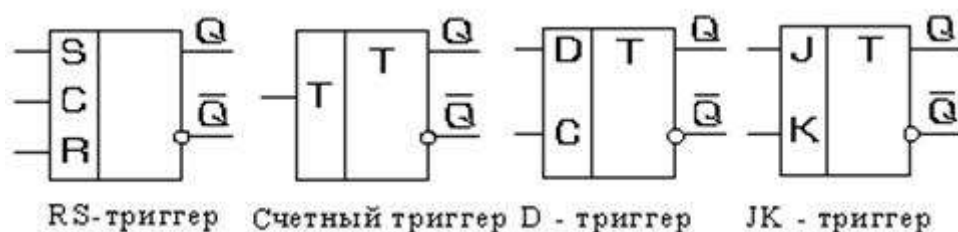


Рис.4.1. 6. Условные обозначения триггеров

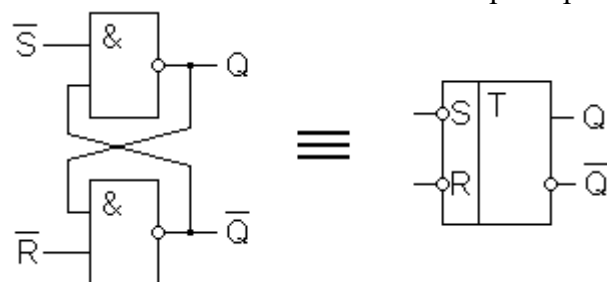


Рис.4.2. . Схема асинхронного RS-триггера и его условное обозначение (кружки у входов указывают на инверсные входы – управление сигналом логического 0)

В основе всех схем триггеров лежит основной (базовый триггер защелка) асинхронный RS-триггер. RS-триггер может быть построен на двух логических элементах И-НЕ (рис.4.2) (или ИЛИ-НЕ).

Элементы охвачены цепями обратных связей, для чего выход каждого элемента подключен к одному из входов другого элемента.

Триггер имеет два входа: S – вход установки в единичное состояние (от англ. set – установка) и R – вход сброса в нулевое состояние (от англ. reset – сброс). Логика элементов И-НЕ, на которых построен триггер имеет простое словесное выражение: любой ноль на входе дает единицу на выходе. Из этого следует, что управляющими сигналами для этого триггера будут сигналы логического 0.

При подаче нуля на вход S и единицы на вход R ($S=0, R=1$) на прямом выходе будет уровень логической 1. Эта единица по цепи обратной связи поступает на один из входов нижнего по

схеме элемента и вместе с единицей на входе R дает логический 0 на инверсном выходе. Это режим установки триггера в единичное состояние.

При входных сигналах S=1 и R=0 триггер будет установлен в нулевое состояние: на прямом выходе уровень логического 0, на инверсном – 1.

При подаче на оба входа нулевых сигналов на обоих выходах триггера появится уровень логической 1. Это запрещенный режим. Нельзя одновременно подавать сигналы на установку триггера в нулевое и единичное состояние.

В случае, если S=1 и R=1, то триггер не изменяет своего состояния. В этом можно убедиться, предполагая последовательно, что триггер находился в нулевом или единичном состоянии. Полная таблица истинности RS-триггера приведена в табл. 4.1.

Таблица 4.1. 4

$Q_t, Q_{t+1}, \bar{Q}_{t+1}$

Уравнения, описывающие эту таблицу для Q_{t+1} и \bar{Q}_{t+1} после их упрощения (способы написания таких уравнений описаны ниже в разделе «Синтез цифровых схем») имеют вид:

$Q_{t+1} = \bar{S} + R \cdot Q_t$ и $\bar{Q}_{t+1} = \bar{R} + S \cdot \bar{Q}_t$. Здесь Q_t - состояние триггера до подачи управляющих сигналов, Q_{t+1} - состояние триггера после подачи управляющих сигналов.

При S=0 и R=0 $Q_{t+1} = \bar{0} + 0 \cdot Q_t = 1$, $\bar{Q}_{t+1} = \bar{0} + 0 \cdot \bar{Q}_t = 1$;

при S=0 и R=1 $Q_{t+1} = \bar{0} + 1 \cdot Q_t = 1$, $\bar{Q}_{t+1} = \bar{1} + 0 \cdot \bar{Q}_t = 0$;

при S=1 и R=0 $Q_{t+1} = \bar{1} + 0 \cdot Q_t = 0$, $\bar{Q}_{t+1} = \bar{0} + 1 \cdot \bar{Q}_t = 1$;

при S=1 и R=1 $Q_{t+1} = \bar{1} + 1 \cdot Q_t = Q_t$, $\bar{Q}_{t+1} = \bar{1} + 1 \cdot \bar{Q}_t = \bar{Q}_t$.

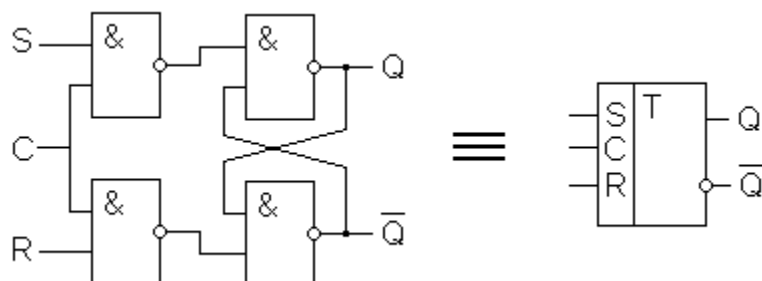


Рис.4.3. 3 8. Схема синхронного RS-триггера на элементах И-НЕ

В синхронном RS-триггере (рис. 4.3 8) использованы 4 логических элемента И-НЕ.

Вход C – вход синхронизации. Переключение триггера под действием входных сигналов S и R возможно только при наличии синхронизирующего импульса, т.е. при C=1. При таком

(единичном) сигнале на входе C входные элементы И-НЕ по другому входу выполняют функцию НЕ, т.е. этот триггер по входам S и R управляется единичными сигналами. При C=0 на выходах входных элементов будут уровни логической 1, что для следующего за входными элементами простого RS-триггера (см. табл.4.1) определяет режим хранения, т.е. триггер хранит свое предыдущее состояние и не переключается.

При C=1, S=0 и R=0 на выходах входных элементов уровни логической 1 – триггер находится в режиме хранения (см. рис.4.4).

При C=1, S=0 и R=1 на прямом выходе появится логический 0, на инверсном – 1. Это режим установки триггера в нулевое состояние.

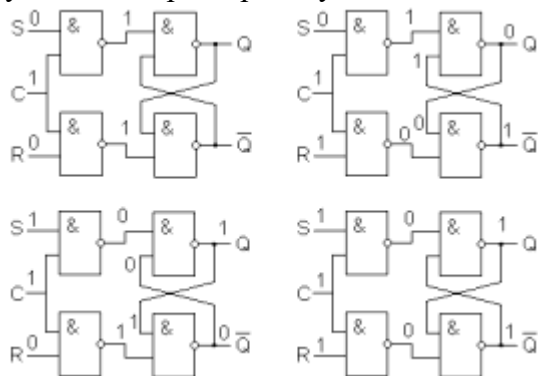


Рис.4.4. 9. Распределение сигналов в синхронном RS-триггере при разных комбинациях сигналов на входах R и S (при C=1)

При C=1, S=1 и R=0 на прямом выходе логическая 1, на инверсном – 0. Это режим установки триггера в единичное состояние.

При C=1, S=1 и R=1 на обоих выходах уровень логической 1 – запрещенный режим. Запрещено одновременно подавать сигналы на установку триггера в единичное и нулевое состояние.

Уравнения для синхронного RS-триггера:

$$Q_{t+1} = C \cdot S + Q_t \cdot (\bar{C} + \bar{R}), \quad \bar{Q}_{t+1} = C \cdot R + \bar{Q}_t \cdot (\bar{C} + \bar{S}).$$

Подставляя в уравнения разные значения C, S, R и Q_t, получаем результаты, совпадающие с данными, полученными при анализе схемы.

D-триггер (рис. 4.5 10) имеет в своем составе 4 логических элемента И-НЕ, два из которых образуют простой RS-триггер, а входные подключены к клеммам D (вход приема информации) и C (вход синхронизации). При C=0, как и в синхронном триггере, на выходах входных элементов установятся уровни логической 1. Для выходного RS-триггера это режим хранения.

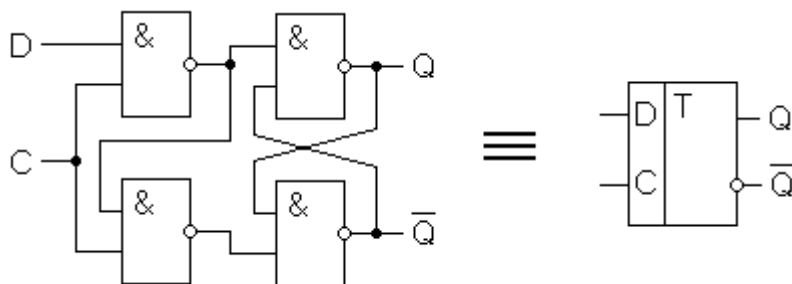


Рис. 4.5 10. Схема D-триггера на логических элементах И-НЕ

Независимо от состояния входа D на выходе информация не меняется (Q_{t+1}=Q_t). При C=1 информация со входа D переписывается на выход Q (Q_{t+1} = D_t). Проследить за состояниями сигналов во всех точках схемы D-триггера при D=0 и D=1 можно по рис. 11.

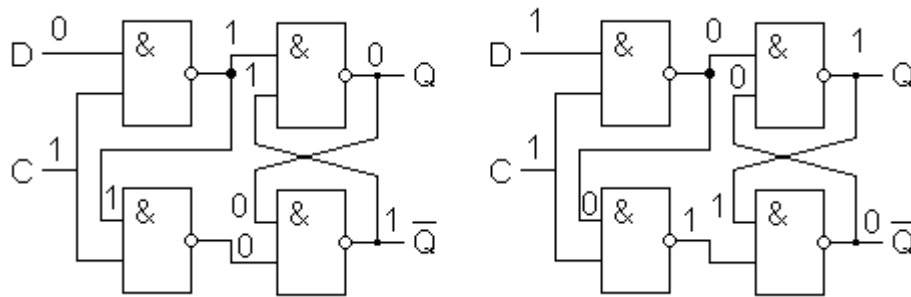


Рис.4.6 11. Распределение сигналов в D-триггере при $D=0$ (слева) и $D=1$ (справа)

В T-триггере, при каждом импульсе на входе T, триггер переключается в противоположное состояние. T-триггер может быть построен на основе D-триггера при соединении инверсного выхода \bar{Q} со входом D. Вход C D-триггера становится входом T T-триггера. T-триггер может быть построен также на основе синхронного RS-триггера соединением входа R с прямым выходом Q, а входа S с инверсным выходом \bar{Q} (рис.4.7 12).

Принцип работы T-триггера иллюстрируется диаграммами напряжений на рис. 13.

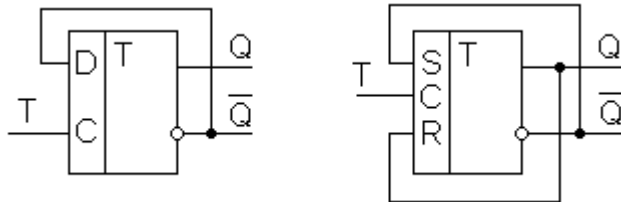


Рис.4.7 12. Варианты реализации T-триггера

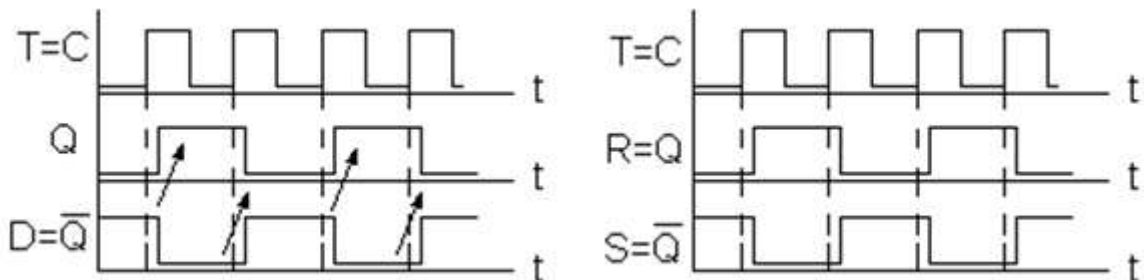


Рис.4.8 13. Диаграммы напряжений для T-триггера, построенного на основе D-триггера (слева) и синхронного RS-триггера (справа)

Для реализации T-триггера необходимо использовать не простые (статические) D или RS-триггеры, описанные выше и срабатывающие по единичному уровню на входе C, а динамические триггеры, срабатывающие по фронту сигнала на входе C. Тогда для схемы T-триггера на основе D-триггера к моменту прихода первого фронта на входе C, на входе D был уровень логической 1. Эта единица и переписывается на выход Q согласно логике D-триггера. На инверсном выходе появится логический 0. К приходу второго фронта входного сигнала (C) на входе D был уровень логического 0. Он и переписывается на выход Q. Эти процессы записи информации со входа D на выход Q показаны на рис. 4.8 стрелками. Для T-триггера на основе синхронного RS-триггера процессы аналогичны и основаны на логике синхронного RS-триггера. К моменту прихода первого фронта сигнала на вход C, на входе R был уровень логического 0, а на входе S – уровень логической 1. Триггер установится в единичное состояние. При следующем такте (фронте на входе C) входы R и S обмениваются состояниями, на выходе Q появится уровень логического 0.

Таким образом, при каждом входном импульсе Т-триггер переключается в противоположное состояние. Если сравнить периоды входного и выходного сигналов, то можно заметить, что период выходного сигнала в 2 раза больше входного. Т.е. Т-триггер является делителем частоты на 2 и используется в схемах деления частоты и в цифровых счетчиках.

Триггер Шмидта

Триггер Шмидта применяется для формирования входного сигнала произвольной формы в сигналы, принимающие два стандартных уровня "0" и "1". Варианты схем таких формирователей показаны на рис. 4.9

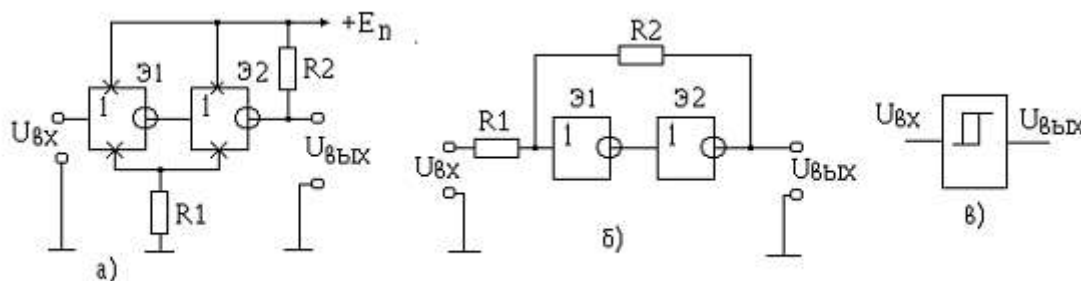


Рис. 4.6. Схема триггеров Шмидта

рис 4.9

На рис. 4.9, а показана схема триггера Шмитта, в которой применены два инвертора, входящие в серию логических транзисторно-транзисторных интегральных схем. Положительная обратная связь между инверторами обеспечивается за счет резистора R1, включенного в общую цепь питания элементов. Для увеличения влияния цепи обратной связи, ток через второй инвертор увеличен путем включения дополнительного резистора R2 между выходом Э2 и источником питания. Подобный формирователь на интегральных схемах серии K1533 удовлетворительно работает до частоты несколько мегагерц при подаче на вход синусоидального напряжения амплитудой 0,5 - 0,8 В.

В триггерах Шмитта положительную обратную связь можно ввести также путем включения резистора между выходом второго инвертора и входом первого (рис. 4.6, б). Входное напряжение в этом формирователе подается через дополнительный резистор R1, сопротивление которого также влияет на глубину положительной обратной связи. Увеличение сопротивления этого резистора увеличивает коэффициент положительной обратной связи и уменьшает чувствительность формирователя к входному напряжению.

Контрольные вопросы.

1. Классификация триггеров простейший триггер защелка RS-триггеры
2. синхронные и асинхронные триггеры.
3. Т-триггеры и D-триггеры.
4. Универсальные триггеры – JK-триггеры
5. триггер Шмидта

Тема 21. Логические элементы

При создании релейных автоматических систем аналитическая запись структуры и условия работы схемы позволяют найти ее оптимальный вариант. С этой целью делают аналитические равносильные преобразования и находят схемы, аналогичные по своему действию, но разные по структуре.

В основе этих преобразований лежат методы преобразования, базирующиеся на математическом аппарате алгебры логики (ее еще называют булевой алгеброй - по фамилии английского математика прошлого века Д.Буля).

В обычной математике оперируют числами или символами, которым могут быть приданы определенные численные значения и физический смысл. Однако те или иные события и явления можно оценивать путем логического их толкования, то есть перейти к «исчислению

высказываний» - математической логике.

Часть математической логики, где оперируют двумя высказываниями: «истинно» или «ложно», «да» или «нет», «1» или «0», получила название алгебры логики (или двоичной булевой алгебры). По существу исчисление высказываний представляет собой алгебру двух чисел, где любой аргумент и любая функция могут иметь одно из двух этих понятий или значений.

Таблица 1 – Таблицы истинности основных функций двух переменных

Дизъюнкция			Конъюнкция			Исключающее ИЛИ			Стрелка Пирса			Штрих Шеффера		
X1	X2	Y	X1	X2	Y	X1	X2	Y	X1	X2	Y	X1	X2	Y
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1
1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1
1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0

Дизъюнкция. В отличие от обычного арифметического или алгебраического суммирования здесь наличие двух единиц даёт в результате единицу. Поэтому при обозначении логического суммирования предпочтение следует отдать знаку (\vee) вместо знака (+).

Первые две строчки таблицы истинности операции дизъюнкции ($x_1=0$) определяют закон сложения с нулём: $x \vee 0 = x$, а вторые две строчки ($x_1 = 1$) — закон сложения с единицей: $x \vee 1 = 1$.

Конъюнкция. Таблица 1 убедительно показывает тождественность операций обычного и логического умножений. Поэтому в качестве знака логического умножения возможно использование привычного знака обычного умножения в виде точки.

Первые две строчки таблицы истинности операции конъюнкции определяют закон умножения на ноль: $x \cdot 0 = 0$, а вторые две — закон умножения на единицу: $x \cdot 1 = x$.

Исключающее ИЛИ. Под функцией «Исключающее ИЛИ» понимают следующее: единица на выходе появляется тогда, когда только на одном входе присутствует единица. Если единиц на входах две или больше, или если на всех входах нули, то на выходе будет ноль.

Надпись на обозначении элемента ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ «=1» (Рисунок 10, г) как раз и обозначает, что выделяется ситуация, когда на входах одна и только одна единица.

Эта операция аналогична операции арифметического суммирования, но как и другие логические операции без образования переноса. Поэтому она имеет другое название *сумма по модулю 2* и обозначение \oplus , сходное с обозначением арифметического суммирования.

Стрелка Пирса и штрих Шеффера. Эти операции являются инверсиями операций дизъюнкции и конъюнкции и специального обозначения не имеют.

Рассмотренные логические функции являются простыми или элементарными, так как значение их истинности не зависит от истинности других каких-либо функций, а зависит только от независимых переменных, называемых *аргументами*.

В цифровых вычислительных устройствах используются сложные логические функции, которые разрабатываются на основе элементарных функций.

Сложной является логическая функция, значение истинности которой зависит от истинности других функций. Эти функции являются аргументами данной сложной функции.

Например, в сложной логической функции $Y = \overline{X_1 \vee X_2 \cdot X_3} \& X_4$ аргументами

являются $X_1 \vee X_2$ и $\overline{X_3 \& X_4}$.

Логические элементы

Для реализации логических функций в устройствах цифровой обработки информации используются логические элементы. Условные графические обозначения (УГО) логических элементов, реализующих рассмотренные выше функции, приведены на рисунке 10.

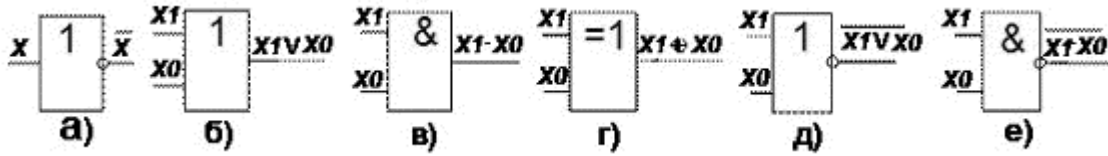


Рисунок 10 – УГО логических элементов:

а) Инвертор, б) ИЛИ, в) И, г) Исключающее ИЛИ, д) ИЛИ-НЕ, е) И-НЕ.

Сложные логические функции реализуются на основе простых логических элементов, путём их соответствующего соединения для реализации конкретной аналитической функции. Функциональная схема логического устройства, реализующего сложную

функцию, $Y = \overline{X_1 \vee X_2 \cdot X_3 \& X_4}$, приведённую в предыдущем параграфе, приведена на рисунке 11.

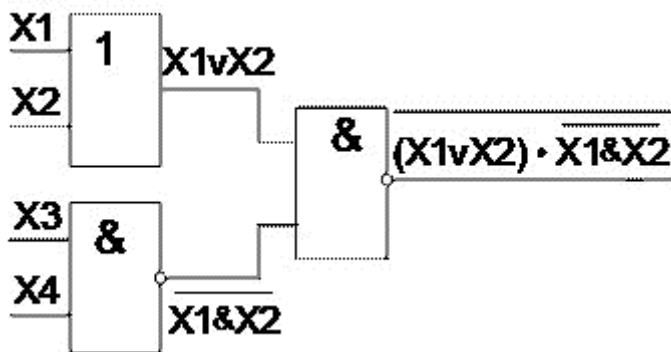


Рисунок 11 – Пример реализации сложной логической функции

Как видно из рисунка 11, логическое уравнение показывает, из каких ЛЭ и какими соединениями можно создать заданное логическое устройство.

Поскольку логическое уравнение и функциональная схема имеют однозначное соответствие, то целесообразно упростить логическую функцию, используя законы алгебры логики и, следовательно, сократить количество или изменить номенклатуру ЛЭ при её реализации.

Поскольку в контактных релейных системах автоматики любой контакт схемы может принимать только два положения (в структурной формуле только два значения) - замкнутое или разомкнутое, то точно так же вся структурная формула может выражать или замкнутую, или разомкнутую цепь. При этом разомкнутому состоянию контактов соответствует значение ноль (0). Для бесконтактных же элементов наличие напряжения (тока) соответствует единице (1), а их отсутствие - нулю (0).

Правила старшинства логических операций.

1. Отрицание — логическое действие первой степени.
2. Конъюнкция — логическое действие второй степени.
3. Дизъюнкция — логическое действие третьей степени.

Если в логическом выражении встречаются действия различных ступеней, то сначала выполняются операции первой ступени, затем второй и только после этого третьей ступени. Всякое отклонение от этого порядка должно быть обозначено скобками.

Законы алгебры логики

В булевой алгебре выделяют четыре пары законов, которые позволяют установить равносильность различных выражений, что дает возможность заменить одно выражение другим. А так как каждому выражению соответствует своя определенная схема, то это означает и замену одной схемы другой. В качестве символа равносильности используется символ равенства из обычной алгебры ($=$).

Рассмотрим основные законы и вытекающие из них следствия, устанавливая их справедливость путем анализа схем, соответствующих правым и левым частям равносильных выражений.

1) Переместительные (коммутативные) законы:

Относительно сложения

$$a+b+c = b+c+a$$

относительно умножения $abc = cba$

2) Сочетательные (ассоциативные) законы:

относительно сложения $(a+b)+c = a+(b+c)$, относительно умножения $(ab)c = a(bc)$.

3) распределительные (дистрибутивные) законы:

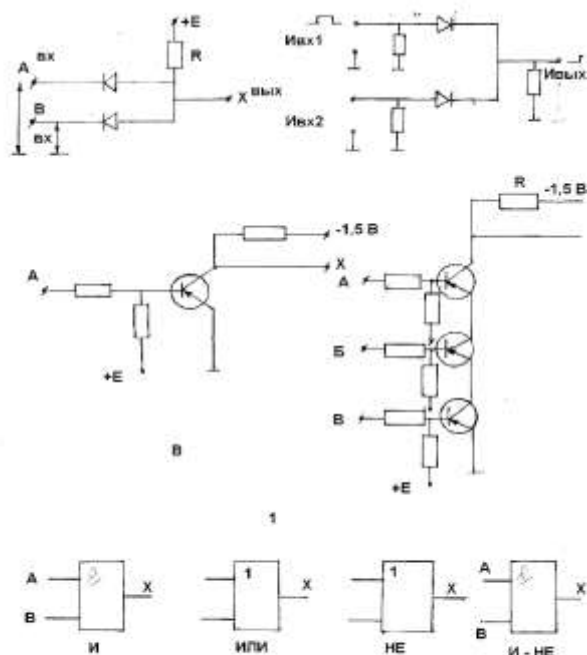
Сложение относительно умножения $ab+c = (a+c)(b+c)$

Умножение относительно сложения $(a+b)c = ac+bc$

4) законы инверсии:

относительно сложения $a+\bar{a} = 1$, относительно умножения $a\bar{a} = 0$, черта над левыми частями равенств означает, что берется отрицание от данного выражения (инверсия), а в правой части получаются выражения, которые имеют обратное значение по отношению к исходному.

Логические схемы



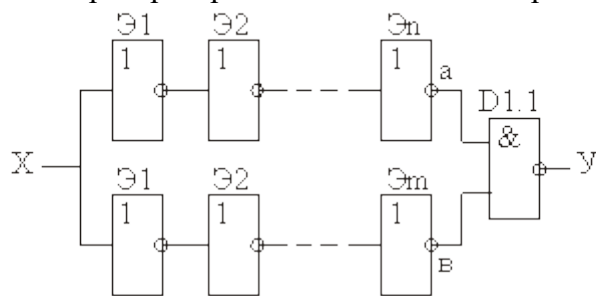
Контрольные вопросы

1. Логические элементы это
2. Дизъюнкция.
3. Конъюнкция.
4. Исключающее ИЛИ.

Тема 22. Счетчики импульсов, дешифраторы.

Комбинационное устройство (КУ) - это устройство с m входами и n выходами. Если КУ выполнено на базе идеальных, т.е. безинерционных элементов, состояние выходов однозначно определяется состоянием входов в тот же момент времени. Однако, инерционность элементов и наличие различных факторов, приводящих к задержке распространения сигнала, приводят к задержке появления выходных сигналов КУ, т.е. сигналы на выходе КУ, соответствующие новому состоянию входных сигналов, появляются не сразу, а с некоторой задержкой. При этом в переходный период возможно появление на выходах устройства некоторых промежуточных значений сигналов, не соответствующих заданному состоянию устройства. Такое явление получило название состязаний или гонок. Обычно, вырабатываемые узлами КУ промежуточные значения сигналов, представляют собой импульсы очень малой длительности, являющиеся помехой для всей цифровой системы. Они могут запускать непредусмотренное срабатывание триггеров, счетчиков и осуществлять нежелательные записи в регистры.

Рассмотрим в качестве примера фрагмент схемы комбинационного устройства (рис. 2.1), где может наблюдаться явление гонок. Для наглядности процесса формирования промежуточного значения выходного сигнала приведены [временные диаграммы](#) состояний различных цепей распространения в идеальном и реальном случаях (рис.2.2, рис. 2.3).



n - четное число; m - нечетное число элементов

Рис. 2.1. Фрагмент схемы КУ, иллюстрирующий возможность проявления гонок

Время задержки импульсов в цепях определяется средним временем задержки распространения сигнала всеми элементами этой цепи. Момент времени появления импульса помехи определяется соотношением числа инвертирующих элементов в конкурирующих цепях фрагмента схемы КУ (см. рис.2.2, а и рис.2.3).

Как следует из рис.2.2, а, если элементы схемы идеальные, т. е. безынерционные, (что на практике достичь не удастся), на выходе схемы КУ импульс помехи отсутствует. Однако в реальных схемах всегда имеет место явление гонок и требуется создать такие схемы, в которых влияние этого явления устраняется.

Борьба с гонками. Существует три наиболее часто встречающихся способа борьбы с гонками:

- [тактирование](#);
- построение противогоночных схем;

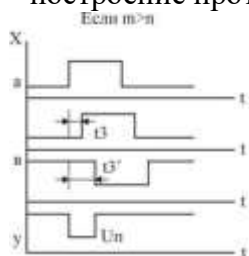


Рис. 2.3. Временные диаграммы, поясняющие работу КУ в случае $m \neq n$ с реальными логическими элементами. Здесь U_n - напряжение помехи, вызванное на выходе схемы гонками

Рис 7.7.

- учет минимального времени задержки распространения сигнала.

Пример реализации тактирования цикла работы комбинационного устройства (рис.2.4).

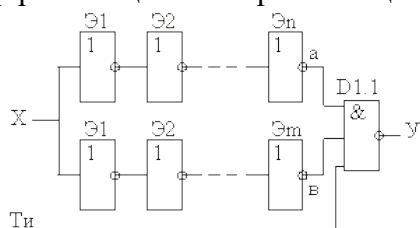


Рис. 2.4. Фрагмент схемы КУ, с тактированием выходного сигнала с помощью трехходового элемента конъюнкции

Рис 7.8.

Шифраторы

Шифратор - это логическое устройство, выполняющее преобразование позиционного кода в n разрядный двоичный код. Таким образом, шифратор - это комбинационное устройство, реализующее обратную дешифратору функцию.

Пример шифратора для трех переменных.

Таблица состояния шифратора:

X	Z2	Z1	Z0	
X0	0	0	0	
X1	0	0	1	
X2	0	1	0	$Z0 = X1 + X3 + X5 + X7$
X3	0	1	1	$Z1 = X2 + X3 + X6 + X7$
X4	1	0	0	$Z2 = X4 + X5 + X6 + X7$
X5	1	0	1	
X6	1	1	0	
X7	1	1	1	

Схема шифратора семиразрядного позиционного кода в трехразрядный двоичный код приведена на рис.7.9. 2.12.

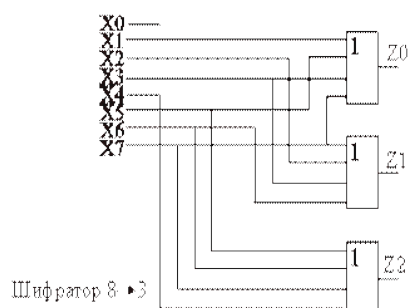


Рис. 2.12. Схема шифратора кода

Рис 7.9

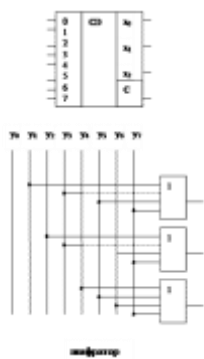


Рис 7.10

Дешифратором называется комбинационное устройство, имеющее n входов и m выходов и преобразующее входной код в сигнал в отдельной выходной линии. Другими словами в дешифраторе (декодере) каждому предусмотренному набору входных сигналов соответствует один, вполне определенный, возбужденный выход. Дешифратор называют также преобразователем двоичного (позиционного) кода в унитарный, т.е. содержащий только одну единицу среди нулей (или один нуль среди единиц). Если входной код назвать адресом, то говорят, что декодер преобразует позиционный адрес в физический или пространственный, т.е. указывает своим единственным возбужденным выходом на ту точку пространства, к которой этот код ведет. Дешифратор называется полным, если он имеет столько выходов m , сколько различных комбинаций может иметь n -разрядное двоичное число на его входах, т.е. $m = 2^n$.

Рассмотрим полный дешифратор с $n=2$ и $m=4$ с прямыми выходами, т.е. на возбужденном выходе уровень логической 1. Такой дешифратор называют дешифратором по единицам, в отличие от дешифратора по нулям, когда на возбужденном выходе уровень логического 0. Обозначим входы символом x , а выходы – y . Таблица истинности имеет вид:

1 0 0 1 2 3

Запишем структурные формулы для всех выходов:

$$y_0 = \overline{x_1} \cdot \overline{x_0}, \quad y_1 = \overline{x_1} \cdot x_0, \quad y_2 = x_1 \cdot \overline{x_0}, \quad y_3 = x_1 \cdot x_0. \quad (8)$$

Схема дешифратора и его условное обозначение на рис. 23.

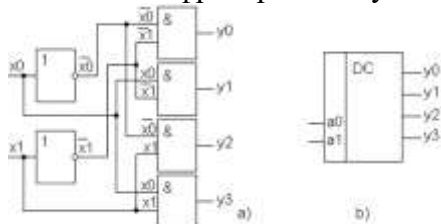


Рис. 7.11. 23. Схема дешифратора (а) и его условное обозначение (b)

Дешифратор по нулям можно построить, исходя из его таблицы истинности, которая строится аналогично дешифратору по единицам, только на активных выходах будут уровни логического 0, и записывая уравнения во второй стандартной форме. В схеме вместо четырех элементов И будут использованы 4 элемента ИЛИ. Таблица истинности дешифратора по нулям полностью инверсна таблице истинности дешифратора по единицам, поэтому его схему можно построить, заменяя в схеме на рис. 23 элементы И на элементы И-НЕ.

Линейный или одноступенчатый дешифратор. Дешифратор - это комбинационное устройство, предназначенное для преобразования параллельного двоичного кода в унитарный, т.е. позиционный код. Обычно, указанный в схеме номер вывода дешифратора соответствует десятичному эквиваленту двоичного кода, подаваемого на вход дешифратора в качестве входных переменных, вернее сказать, что при подаче на вход устройства параллельного двоичного кода на выходе дешифратора появится сигнал на том выходе, номер которого соответствует десятичному эквиваленту двоичного кода. Отсюда следует то, что в любой момент времени выходной сигнал будет иметь место только на одном выходе дешифратора. В зависимости от типа дешифратора, этот сигнал может иметь как уровень логической единицы (при этом на всех остальных выходах уровень логического 0), так и уровень логического 0 (при этом на всех остальных выходах уровень логической 1). В дешифраторах каждой выходной функции соответствует только один минтерм, а количество функций определяется количеством разрядов двоичного числа. Если дешифратор реализует все минтермы входных переменных, то он называется полным дешифратором (в качестве примера неполного дешифратора можно привести дешифратор двоично-десятичных чисел). Рассмотрим пример синтеза дешифратора (полного) $3 \text{ @ } 8$, следовательно, количество разрядов двоичного числа - 3, количество выходов - 8.

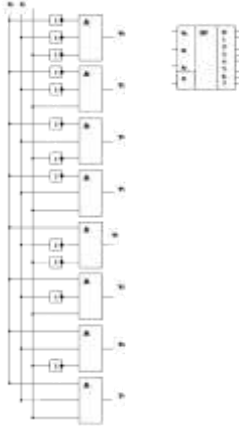
Таблица состояний дешифратора

$\{3 \text{ X2 X1} \quad \}0 \text{ Z1 Z2 Z3 Z4 Z5 Z6 Z7}$

00001010011100 0000000010000000010000000010000000010
 01110111 0000001000000001000000001

7Как следует из таблицы состояния, каждой функции соответствует только один минтерм, следовательно, не требуется минимизировать эти функции (рис. 2.9).

Из полученных уравнений и схемы дешифратора следует, что для реализации полного дешифратора на m входов (переменных) потребуются $n = 2^m$ элементов конъюнкции (количество входов каждого элемента “И” равно m) и m элементов отрицания.



Дешифратор

Счетчиком называют устройство, сигналы на выходах которого в определенном коде отображают число импульсов, поступивших на счетный вход. Используются для подсчета числа импульсов и деления частоты. Счетчики строятся на базе триггеров. Триггер Т-типа может служить примером простейшего счетчика, считающего до двух. Если соединить последовательно m триггеров, можно подсчитать в двоичном коде 2^m импульсов. Число m определяет число разрядов, а число 2 — основание системы счисления.

На практике могут использоваться различные системы счисления (коды). Символом счетчика на логических схемах служат буквы *СТ* (counter) и число, характеризующее систему счисления (2, 10, 2/10). основными эксплуатационными показателями счетчика являются его емкость и быстродействие. Быстродействие счетчика определяется двумя параметрами: разрешающей способностью $t_{раз}$ и временем установки кода счетчика $t_{уст}$. Под разрешающей способностью понимают минимальное время между входными импульсами, при котором счетчик еще в состоянии их подсчитывать. Обратная величина

$$f_{max} = 1/t_{раз}$$

называется максимальной частотой счета. Время установки кода $t_{уст}$ равно времени между моментом поступления входного сигнала и моментом установки счетчика в новое устойчивое состояние. Быстродействие зависит от элементной базы счетчика и способов соединения отдельных микросхем между собой.

Классификация счетчиков. Цифровые счетчики классифицируются по следующим параметрам: используемой системе счисления (двоичные, десятичные, двоично-десятичные, в коде Джонсона); направлению счета (суммирующие, вычитающие, реверсивные); способу

организации связей между разрядами (с последовательным переносом, с параллельным переносом, кольцевые).

Рассмотрим несколько примеров интегральных счетчиков.

Двоичный четырехразрядный счетчик встречается практически во всех сериях цифровых микросхем. Счетчик содержит 4 Т-триггера, выходы которых $Q_0 - Q_3$ образуют параллельный двоичный код состояния счетчика. За исходное состояние счетчика принимается такое, при котором все триггеры находятся в нулевом положении. Принудительная установка счетчика в исходное состояние осуществляется подачей сигнала лог.1 на вход сброса R . Таблица состояний счетчика имеет следующий вид:

Комер входного импульса $\downarrow_3 \downarrow_2 \downarrow_1 \downarrow_0$

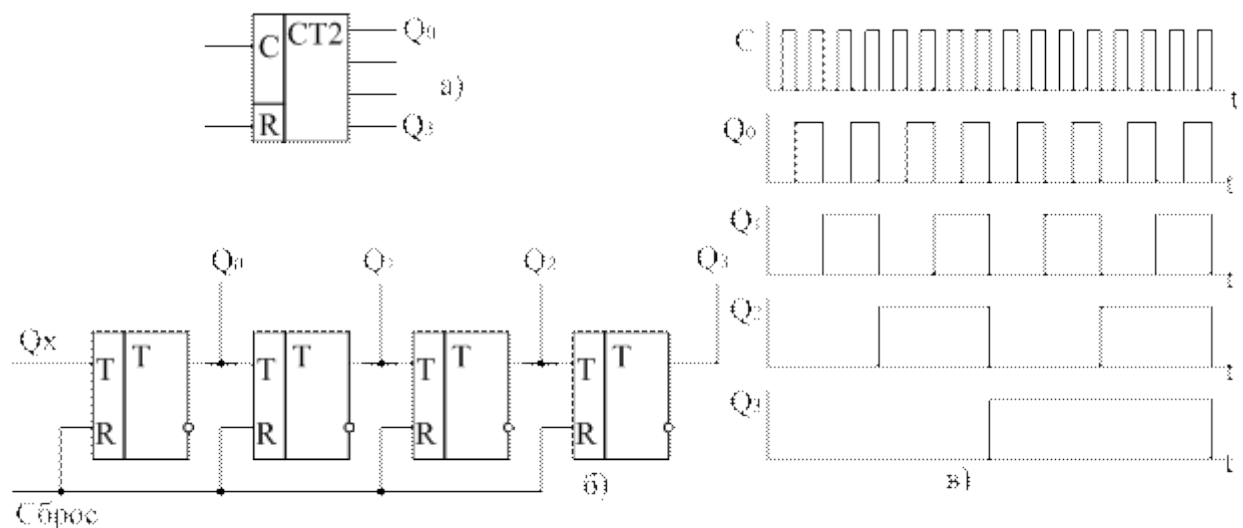


Рис.5.22. 4 - разрядный двоичный счетчик: а - условное обозначение; б - структура; в - временная диаграмма.

Таким образом, счетчик имеет 16 состояний, т.е. его емкость $N = 2^m = 16$. Здесь $m = 4$ —

число разрядов. На рис. 5.22 показаны условное обозначение такого счетчика, его внутренняя структура и временная диаграмма. Переворот триггера младшего разряда происходит по спаду входного импульса. Триггеры в разрядах соединены между собой последовательно, т.е. представляют собой схему с последовательным переносом. Такая схема логически наиболее проста, но обладает большой задержкой сигнала, особенно в тех случаях, когда последовательно срабатывает большое количество триггеров. Микросхемы позволяют последовательно наращивать емкость двоичных счетчиков кратно 4 разрядам.

В качестве примеров асинхронных двоичных счетчиков на рис.5.23 показаны микросхемы К155ИЕ5 и К555ИЕ19.

Первая в одном корпусе содержит одно и трехразрядные счетчики, а вторая — два четырехразрядных счетчика. Соединяя выход одного счетчика с входом другого (показано штрихами), можно наращивать разрядность. Сброс счетчиков К155ИЕ5 в исходное состояние производится подачей сигнала лог.1 на оба входа 2,3 одновременно.

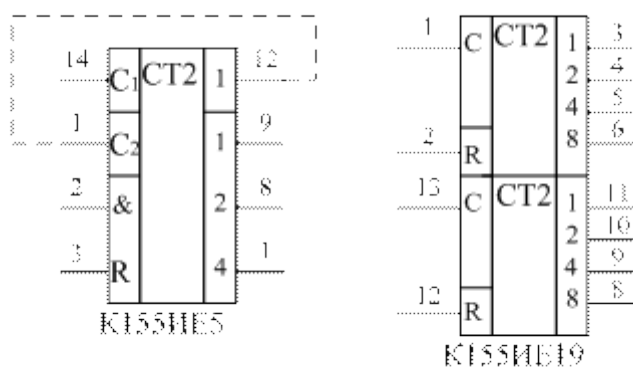


Рис.5.23. Примеры двоичных асинхронных счетчиков.

В делителях частоты, в отличие от счетчиков, выводы могут браться не от всех разрядных триггеров. За счет этого можно повысить коэффициент пересчета (деления) микросхемы при том же количестве выводов корпуса.

Вычитающие двоичные счетчики строятся аналогично и отличаются от суммирующих только связями между разрядами. Последовательность состояний триггеров вычитающего счетчика обратна последовательности суммирующего: после исходного состояния 0000 четырехразрядный двоичный счетчик переходит в состояние 1111 и далее в последовательности от 16 состояния к 14, 13, 12 и т.д. до исходного.

Контрольные вопросы:

1. Какое устройство называется дешифратором?
2. Шифратор

3. Комбинационное устройство
4. Счетчик импульса называется
5. Классификация счетчиков

Тема 23. Регистры и распределительные сети

Регистр — устройство для записи, хранения и считывания n -разрядных двоичных данных и выполнения других операций над ними^[1].

Регистр представляет собой упорядоченный набор триггеров, обычно D-триггеров, число которых соответствует числу разрядов в слове. С регистром может быть связано комбинационное цифровое устройство, с помощью которого обеспечивается выполнение некоторых операций над словами.

Основой построения регистров являются: D-триггеры, RS-триггеры, JK-триггеры.

□ Операции в регистрах [[править](#) | [править код](#)]

Типичными являются следующие операции:

приём слова в регистр (установка состояния);

передача слова из регистра;

сдвиг слова влево или вправо на заданное число разрядов в сдвиговых регистрах;

преобразование последовательного кода слова в параллельный и обратно;

установка регистра в начальное состояние (сброс).

Классификация регистров [[править](#) | [править код](#)]

Регистры классифицируются^[2] по следующим видам:

накопительные (регистры памяти, хранения)^{[3][4]};

сдвигающие или сдвиговые^{[5][6][7][8][9][10][11][12][13][14][15]}.

В свою очередь сдвигающие регистры делятся:

по способу ввода-вывода информации:

параллельные: запись и считывание информации происходит одновременно на все входы и со всех выходов^[16];

последовательные: запись и считывание информации происходит в первый триггер, а та информация, которая была в этом триггере, перезаписывается в следующий — то же самое происходит и с остальными триггерами^{[17][18]};

комбинированные;

по направлению передачи информации:

однонаправленные;

реверсивные^{[19][20]}.

Типы регистров [[править](#) | [править код](#)]

Регистры различают по типу ввода (загрузки, приёма) и вывода (выгрузки, выдачи) информации:

С последовательным вводом и выводом информации

С параллельным вводом и выводом информации

С параллельным вводом и последовательным выводом. Например: SN74LS165J(N), SN74166J(N), SN74LS166J(N)

С последовательным вводом и параллельным выводом. Например: SN7416J(N), SN74LS164J(N), SN74LS322J(N), SN74LS673J(N)

Использование триггеров с защёлками с тремя состояниями на выходе, увеличенная (по сравнению со стандартными микросхемами серии) нагрузочная способность позволяют использовать (в микропроцессорных системах с магистральной организацией) регистры непосредственно на магистраль в качестве регистров, буферных регистров, регистров ввода-вывода, магистрального передатчика и т. д. без дополнительных схем интерфейса.

Помимо вышеописанных двоичных регистров, регистр может основываться и на иной системе счисления, например троичной^[↔] или десятичной.

Параллельные регистры[\[править\]](#) | [править код](#)

В параллельных (статических) регистрах схемы разрядов не обмениваются данными между собой. Общими для разрядов обычно являются цепи тактирования, сброса/установки, разрешения выхода или приема, то есть цепи управления. Пример схемы статического регистра, построенного на триггерах типа D с прямыми динамическими входами, имеющего входы сброса и выходы с третьим состоянием, управляемые сигналом EZ.

Сдвигающие (последовательные) регистры[\[править\]](#) | [править код](#)

Последовательные (сдвигающие) регистры представляют собою цепочку разрядных схем, связанных цепями переноса. Основной режим работы — сдвиг разрядов кода от одного триггера к другому на каждый импульс тактового сигнала. В одноктактных регистрах со сдвигом на один разряд вправо слово сдвигается при поступлении тактового сигнала. Вход и выход последовательные (англ. *Data Serial Right, DSR*).

Согласно требованиям синхронизации в сдвигающих регистрах, не имеющих логических элементов в межразрядных связях, нельзя применять одноступенчатые триггеры, управляемые уровнем, поскольку некоторые триггеры могут за время действия разрешающего уровня синхросигнала переключиться неоднократно, что недопустимо. Появление в межразрядных связях логических элементов, и тем более, логических схем неединичной глубины упрощает выполнение условий работоспособности регистров и расширяет спектр типов триггеров, пригодных для этих схем. Многотактные сдвигающие регистры управляются несколькими синхропоследовательностями. Из их числа наиболее известны двухтактные с основным и дополнительным регистрами, построенными на простых одноступенчатых триггерах, управляемых уровнем. По такту C1 содержимое основного регистра переписывается в дополнительный, а по такту C2 возвращается в основной, но уже в соседние разряды, что соответствует сдвигу слова. По затратам оборудования и быстродействию этот вариант близок к одноктактному регистру с двухступенчатыми триггерами.

Примеры:

SN74ALS164 (KP1533ИР8) — восьмиразрядный сдвиговый регистр с последовательной загрузкой и параллельной выгрузкой. Оснащён двумя входами, А и В, что позволяет заперев один из них (установив на нём низкий уровень напряжения по положительному фронту тактового импульса), осуществлять ввод данных в последовательном коде по другому входу.

SN74ALS165 (KP1533ИР9), SN74ALS166 (KP1533ИР10) — восьмиразрядный сдвиговый регистр с последовательной выгрузкой, работающий в двух режимах: параллельной загрузки и сдвига,

SN74198 (KP155ИР13) — восьмиразрядный реверсивный сдвиговый регистр, имеющий четыре режима работы: параллельная загрузка, сдвиг влево, сдвиг вправо и блокировка.

SN74LS295 (KP1533ИР16) — четырёхразрядный сдвиговый регистр с параллельной загрузкой и тремя состояниями выходов, имеющий три режима работы: параллельная загрузка, сдвиг влево и блокировка. На основе регистра может быть построен реверсивный сдвигающий регистр с последовательным вводом данных и режимами сдвига влево и вправо^[21].

74HC595N (KP1564ИР52) — восьмиразрядный сдвиговый регистр с защелкой, имеющий возможность параллельного или последовательного объединения с тремя состояниями на выходе: высокий, низкий и высоко-импедансный.

Регистры процессора[\[править\]](#) | [править код](#)

Основная статья: **Регистры процессора**

По назначению регистры процессора различаются на:

аккумулятор — используется для хранения промежуточных результатов арифметических и логических операций и инструкций ввода-вывода;

флаговые — хранят признаки результатов арифметических и логических операций;

общего назначения — хранят операнды арифметических и логических выражений, индексы и адреса;

индексные — хранят индексы исходных и целевых элементов массива;

указательные — хранят указатели на специальные области памяти (указатель текущей операции, указатель базы, указатель стека);

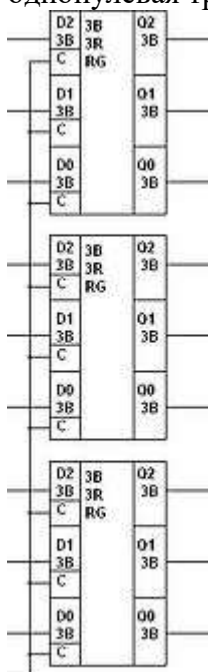
сегментные — хранят адреса и селекторы сегментов памяти;

управляющие — хранят информацию, управляющую состоянием процессора, а также адреса системных таблиц.

Троичные регистры[[править](#) | [править код](#)]

*Основная статья: **Троичный компьютер § Узлы троичных ЭВМ***

Троичные регистры строятся на троичных триггерах. Как и троичные триггеры, троичные регистры могут быть разных троичных систем кодирования троичных данных (троичных разрядов): трёхуровневая однопроводная, двухуровневая двухразрядная двухпроводная, двухуровневая трёхразрядная одноединичная трёхпроводная, двухуровневая трёхразрядная однонулевая трёхпроводная и др.



На рисунке справа приведена схема девятиразрядного параллельного статического строблируемого троичного регистра данных на трёх трёхразрядных параллельных статических строблируемых троичных регистрах данных в трёхбитной одноединичной системе троичных логических элементов (линии с обозначением 3B: трёхпроводные),

имеющего ёмкость в показательной позиционной троичной системе счисления чисел (кодов).

Контрольные вопросы

1. Операции в регистрах
2. Классификация регистров
3. Типы регистр

ДИАГНОСТИКО-КОНТРОЛИРУЮЩИЙ БЛОК

Описание проверочного испытания

Проверочное испытание № 1 , вариант № _____	
Название:	Система обозначений полупроводниковых приборов
Описание задачи: 	Построить на одном листе использования полупроводниковых приборов в электронных устройствах для унификации их обозначения и стандартизации параметров используются системы условных обозначений. Эта система классифицирует полупроводниковые приборы по их назначению, основным физическим и электрическим параметрам, конструктивно-технологическим свойствам, виду полупроводниковых материалов.
Нормированное время.	50 мин
Результаты обучения	Осуществляет сборке таблицы и исследование работы. Определяет.
Критерии оценки выполнения	Понимает особенности конструкции, области применения и принципы работы Оптоэлектронные приборы физическим и электрическим параметрам, конструктивно-технологическим свойствам, виду полупроводниковых материалов

Порядок задания	выполнения	1) Прежде чем приступить к работе надо прочитать краткие теоретические сведения и условие задание. 2) Зачертить таблицу обозначений полупроводниковых приборов 3) Определить Зависимость фото э.д.с. и тока короткого замыкания р-п перехода от величины светового потока.
Перечень оборудования и инструментов.	необходимого	бумага, ручка, линейка, карандаш, калькулятор, нормативная литература.
Место проведения:		Лабораторный корпус №1, аудитория № 108
Дата проведения:		« » 20 г.

Описание проверочного испытания

Проверочное испытание № 2 , вариант №	
Название:	Усилители мощности постоянного тока
Описание задачи:	Составьте сопротивление $R_2 = 1$ кОм. Подберите резистор R_1 такой, чтобы напряжение на участке эмиттер-коллектор было равно половине напряжения источника E_1 (6В). Затем замкните ключ нажатием кнопкой "пробел".
	
Нормированное время.	50 мин
Результаты обучения	Осуществляет сборку схемы, умеет исследовать работу усилители мощности постоянного тока
Критерии оценки выполнения	Понимает устройство, режимы работы и принцип действия усилителей мощности постоянного тока.
Порядок выполнения задания	1) Исследовать работу схемы усилителей мощности постоянного тока. 3) Соберите схему, представленную на рисунке используя усилителей мощности постоянного тока.

	4) В отчете опишите назначение каждого элемента схемы
Перечень необходимого оборудования и инструментов.	бумага, ручка, линейка, карандаш, калькулятор, нормативная литература..
Место проведения:	Лабораторный корпус №1, аудитория №108
Дата проведения:	« » 20 г.

Описание проверочного испытания

Проверочное испытание № 3, вариант №	
Название:	Инверторы и преобразователи
Описание задачи:	Для проведения необходимых экспериментальных исследований универсальный лабораторный стенд в своем составе имеет трехфазный инвертор. Трехфазный инвертор представляет собой мост на шести IGBT транзисторах собранных в одном силовом модуле.
Нормированное время.	50 мин
Результаты обучения	Осуществляет сборку схемы, умеет исследовать работу трехфазных инверторов.
Критерии оценки выполнения	Понимает устройство, режимы работы и принцип действия
Порядок выполнения задания	1. Изучить краткие теоретические сведения об инверторах; 2. Исследовать сигналы управления инвертора с помощью осциллографа (без подключения силовой части);

	3. Исследовать работу силовой части трехфазного инвертора с асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором в качестве нагрузки, исследовать с помощью осциллографа форму кривой тока фазы нагрузки;
Перечень необходимого оборудования и инструментов.	Персональный компьютер, пакет программ Electronic Workbench бумага, ручка, линейка, карандаш, калькулятор, нормативная литература..
Место проведения:	Лабораторный корпус № 1 , аудитория № 108
Дата проведения:	« » 20 г.

Описание проверочного испытания

Проверочное испытание № 4, вариант №	
Название:	Регистры и распределительные сети
Описание задачи:	Изучение схмотехнических принципов построения, записи и считывания информации в наиболее распространенные регистры.
	
Нормированное время.	50 мин
Результаты обучения	Осуществляет сборку схемы, умеет исследовать работу регистры и распределительные сети
Критерии оценки выполнения	Понимает устройство, режимы работы и принцип действия
Порядок выполнения задания	1. Исследовать работу параллельного регистра. 2. Исследовать работу кольцевого регистра.

	3. Исследовать работу микросхемы 555ИР27.
Перечень необходимого оборудования и инструментов.	Персональный компьютер, пакет программ Electronic Workbench бумага, ручка, линейка, карандаш, калькулятор, нормативная литература..
Место проведения:	Лабораторный корпус № 1 , аудитория № 108
Дата проведения:	« » 20 г.

БАҚЫЛАУ ПАРАҒЫ КОНТРОЛЬНЫЙ ЛИСТ

модуля «Применение средств и методов охраны труда и окружающей среды»

ТИП ПРОВЕРОЧНОГО ИСПЫТАНИЯ	Тест	Самостоятельная работа	Карточки задания	Понятийный диктант	Зачет
РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ/ КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ					
Результат обучения 1.	Понимать и читать простые схемы типовой электронной аппаратуры.				
Критерий оценки 1. Понимает простые схемы типовой электронной аппаратуры. Критерий оценки 2. Определяет типы электронных приборов в зависимости от особенностей их применения Критерий оценки 3. Характеризует особенности построения и принцип работы типовых схем преобразовательных устройств и источников питания. Критерий оценки 4. Производит расчет выпрямителей. Критерий оценки 5. Характеризует устройство, принципы действия, основные технические параметры, маркировку, условные обозначения и область применения различных полупроводниковых приборов.					

Критерий оценки 6. Характеризует устройство, принципы действия, основные технические параметры, маркировку, условные обозначения и область применения различных полупроводниковых приборов.			√		
Критерий оценки 7. Понимает усилительные каскады низкой частоты, усилители мощности, многокаскадные усилители, усилители постоянного тока, генераторы и импульсные устройства и объясняет принцип их действия, определяет параметры усилителей операционные усилители, низкой частоты.				√	
Критерий оценки 8. Понимает особенности построения и принцип работы типовых схем преобразовательных устройств и источников питания, производит расчет выпрямителей, составляет таблицы истинности для логических элементов.		√			
Результат обучения 2.	Выбирать типы и эксплуатировать электронные приборы в зависимости от особенностей их применения.				
Критерий оценки 1. Характеризует типовые схемы генераторов и импульсных устройств, источников питания, преобразовательных устройств Критерий оценки 2. Понимает принцип работы основных цифровых устройств. Критерий оценки 3. Определяет перспективы развития электронной техники. Критерий оценки 4. Выбирает типы электронных приборов в зависимости от особенностей их применения. Критерий оценки 5. Выполняет выбор электронных приборов для управления электрооборудованием. Критерий оценки 6. Выполняет эксплуатацию электронных устройств.	√				√
Итоговый контроль по модулю:	1	1	1	1	1

Контрольно-измерительные материалы
Тестовый материал

Допишите пропущенное слово или словосочетание:

Вопрос № 1

- наука о взаимодействии электронов с электромагнитными полями и методах создания электронных приборов и устройств для преобразования электромагнитной энергии для приёма, передачи, обработки и хранения информации.

Выберите правильный ответ:

Вопрос № 2

Триггером называют устройство:

- А) с двумя устойчивыми состояниями
- Б) с одним устойчивым состоянием
- В) с тремя устойчивыми состояниями
- Г) без устойчивых состояний

Вопрос № 3

Коэффициент усиления по напряжению транзисторного каскада определяется по формуле:

- А)
- Б)
- В)
- Г)

Вопрос № 4

Полупроводниковый диод применяется в устройствах электроники для цепей...

- А) усиления напряжения
- Б) выпрямления переменного напряжения
- В) стабилизации напряжения
- Г) регулирования напряжения

Вопрос № 5

Тиристор используется в цепях переменного тока для ...

- А) усиления тока
- Б) усиления напряжения
- В) регулирования выпрямленного напряжения
- Г) изменения фазы напряжения

Вопрос № 6

Выходы триггера имеют название:

- А) инвертирующий и неинвертирующий
- Б) положительный и отрицательный
- В) прямой и обратный
- Г) прямой и инвертный

Вопрос № 7

Коэффициент усиления транзисторного каскада по току:

- А)
- Б)
- В) $KI = U_{вх} / U_{вых}$
- Г) $KI = I_{вых} / I_{вх}$

Вопрос № 8

Положительная обратная связь используется в...

- А) выпрямителях
- Б) генераторах
- В) усилителях
- Г) стабилизаторах

Вопрос № 9

Напряжение между входами операционного усилителя

- А) равно 0
- Б) равно $U_{пит}$
- В) больше 0
- Г) равно $U_{о.с.}$

Вопрос № 10

Коэффициент усиления инвертирующего операционного усилителя с обратной связью:

- А) $K = R_{ос} / R_{вх}$
- Б) $K = (R_{вх} + R_{ос}) / R_{ос}$
- В) $K = R_{вх} / R_{ос}$
- Г) $K = R_{вх} / (R_{вх} + R_{ос})$

Вопрос № 11

Отрицательная обратная связь в усилителях используется с целью...

- А) повышения стабильности усилителя
- Б) повышения коэффициента усилителя
- В) повышения размеров усилителя
- Г) снижения напряжения питания

Вопрос № 12

Основная характеристика резистора:

- А) индуктивность L
- Б) сопротивление R
- В) ёмкость C
- Г) индукция B

Вопрос № 13

Полупроводниковый диод имеет структуру...

- А) p-n-p
- Б) n-p-n
- В) p-n
- Г) p-n-p-n

Вопрос № 14

Электроды полупроводникового диода имеют название:

- А) катод, управляющий электрод
- Б) база, эмиттер

- В) катод, анод
- Г) база 1, база 2

Вопрос № 15

Электроды полупроводникового транзистора имеют название:

- А) коллектор, база, эмиттер
- Б) анод, катод, управляющий электрод
- В) сток, исток, затвор
- Г) анод, сетка, катод

Вопрос № 16

Коэффициент усиления по напряжению эмиттерного повторителя:

- А) $KU=\infty$
- Б) $KU=0$
- В) $KU>1$
- Г) $KU<1$

Вопрос № 17

Триггером называют устройство...

- А) с двумя устойчивыми состояниями
- Б) с одним устойчивым состоянием
- В) с тремя устойчивыми состояниями
- Г) без устойчивых состояний

Вопрос № 18

Выходы триггера имеют название:

- А) положительный и отрицательный
- Б) прямой и инвертный
- В) прямой и обратный
- Г) инвертирующий и неинвертирующий

Вопрос № 19

Триггер имеет количество выходов:

- А) 2
- Б) 1
- В) 3
- Г) 4

Вопрос № 20

Для стабилизации рабочей точки усилительного каскада используют:

- А) увеличение сопротивления нагрузки
- Б) повышение напряжения питания
- В) введение отрицательной обратной связи по постоянному току

Вопрос № 21

Операционный усилитель имеет:

- А) два выхода и два входа
- Б) один вход и два выхода
- В) два входа и один выход
- Г) один вход и два выхода

Вопрос № 22

Логические интегральные микросхемы используют для построения:

- А) цифровых устройств
- Б) усилителей напряжений
- В) выпрямителей
- Г) генераторов

Вопрос № 23

Блокинг-генератор – это устройство для формирования:

- А) постоянного напряжения
- Б) синусоидального напряжения
- В) линейно-изменяющегося напряжения
- Г) коротких импульсов

Вопрос № 24

Триггер со счетным входом переключается при...

- А) поступлении на вход следующего импульса
- Б) изменении полярности входного импульса
- В) изменении амплитуды входного импульса
- Г) изменении питающего напряжения

Вопрос № 25

Отрицательная обратная связь в усилителях используется с целью:

- А) повышения размеров усилителя
- Б) повышения коэффициента усилителя
- В) повышения стабильности усилителя
- Г) снижения напряжения питания

Вопрос № 26

p-n переход образуется при контакте:

- А) металл-металл
- Б) полупроводник-полупроводник
- В) металл-полупроводник
- Г) металл-диэлектрик

Вопрос № 27

При работе транзистора в ключевом режиме ток коллектора равен нулю:

- А) режим насыщения
- Б) режим отсечки
- В) в активном режиме
- Г) режим А

Вопрос № 28

Устройство, предназначенное для обработки или передачи данных:

- А) системная плата
- Б) контроллер
- В) микропроцессор
- Г) ОЗУ

Вопрос № 29

Процессор, функционирующий с сокращенным набором команд:

- А) CISC
- Б) RISC
- В) MISC
- Г) VLIW

Вопрос № 30

Такт работы процессора – это...

- А) период времени, за который осуществляется выполнение команды исходной программы в машинном виде; состоит из нескольких тактов
- Б) устройство, предназначенное для временного хранения данных ограниченного размера
- В) комплекс команд, поддерживающий работу системы
- Г) промежуток времени между соседними импульсами (tick of the internal clock) генератора тактовых импульсов

Вопрос № 31

Процессор, обеспечивающий параллельное выполнение операций над массивами данных, векторами, характеризуется специальной архитектурой, построенной на группе параллельно работающих процессорных элементов – это...

- А) векторный процессор
- Б) матричный процессор
- В) суперскалярный процессор
- Г) скалярный процессор

Вопрос № 32

К основным параметрам МП не относится:

- А) тактовая частота
- Б) внутренняя разрядность данных
- В) пропускная способность
- Г) адресуемая память

Вопрос № 33

Основное исполнительное устройство в процессоре – это...

- А) ядро
- Б) буфер адреса переходов
- В) предсказатель переходов
- Г) шина

Вопрос № 34

Количество бит, которые МП может обрабатывать одновременно – это...

- А) внешняя разрядность данных
- Б) тактовая частота
- В) внутренняя разрядность данных
- Г) степень интеграции микросхемы

Вопрос № 35

Упрощенный вариант РП для дешевых компьютеров – это...

- А) Pentium P55
- Б) Celeron
- В) Cyrix
- Г) AMD

Вопрос № 36

Pentium является...

- А) суперскалярным процессором Intel
- Б) матричным процессором
- В) векторным процессором AMD
- Г) скалярным процессором Intel

Вопрос № 37

Технология обработки данных в процессоре, обеспечивающая более эффективную работу процессора за счет манипулирования данными, а не простого исполнения списка команд – это...

- А) технология 3DNow!
- Б) технология Hyper-Threading
- В) спекулятивное выполнение
- Г) динамическое исполнение

Вопрос № 38

На выходе транзисторного мультивибратора формируются:

- А) прямоугольные импульсы
- Б) синусоидальное напряжение
- В) треугольные импульсы

Г) выпрямленное напряжение

Вопрос № 39

Основная характеристика дросселя:

А) индуктивность L

Б) сопротивление R

В) ёмкость C

Г) частота f

Вопрос № 40

Выходы триггера имеют название:

А) положительный и отрицательный

Б) прямой и инвертный

В) прямой и обратный

Г) инвертирующий и неинвертирующий

Вопрос № 41

Для стабилизации рабочей точки усилительного каскада используют:

А) увеличение сопротивления нагрузки

Б) повышение напряжения питания

В) введение отрицательной обратной связи по постоянному току

Вопрос № 42

Релаксационным называют генератор ...

А) экспоненциальных импульсов

Б) синусоидального напряжения

В) постоянного напряжения

Г) линейно изменяющегося напряжения

Вопрос № 43

Амплитудно-частотной характеристикой усилителя называют зависимость...

А) выходной мощности от частоты входного сигнала

Б) входного сопротивления от частоты входного сигнала

В) выходного сопротивления от частоты входного сигнала

Г) коэффициента усиления от частоты входного сигнала

Вопрос № 44

Входной ток операционного усилителя:

А) $I_{вх} < 0$

Б) $I_{вх} = I_{вых}$

В) $I_{вх} = 0$

Вопрос № 45

Статический коэффициент передачи тока базы биполярного транзистора:

А)

Б)

В)

Г)

Вопрос № 46

Основная характеристика конденсатора:

А) Емкость C

Б) Индуктивность L

В) Сопротивление R

Г) ЭДС E

Вопрос № 47

Триггер со счетным входом переключается при...

А) изменении амплитуды входного импульса

- Б) изменении полярности входного импульса
- В) поступлении на вход следующего импульса
- Г) изменении питающего напряжения

Вопрос № 48

Отрицательная обратная связь в усилителе ...

- А) снижает искажения
- Б) поворачивает усиливаемый сигнал по фазе на 30°
- В) повышает КПД
- Г) повышает коэффициент усиления

Вопрос № 49

Обозначение резистора 5К7 означает величину в ...

- А) 5700 ом
- Б) 5 килоом 700 ом
- В) все ответы верные

Вопрос № 50

Обозначение резистора 1М3 означает величину в ...

- А) одну и три десятых микрогенри
- Б) один миллион триста тысяч ом
- В) все ответы неверные

Вопрос № 51

Обозначение на конденсаторе 40,0 означает величину емкости в ...

- А) 40 миллионов микрофард
- Б) 40 тысяч микрофард
- В) 40 микрофард
- Г) все ответы неверные

Вопрос № 52

Полупроводники по проводимости находятся ...

- А) наполовину выше диэлектриков
- Б) наполовину выше проводников
- В) между диэлектриком и проводником
- Г) наполовину ниже диэлектриков

Вопрос № 53

К недостаткам полупроводниковых приборов относится...

- А) ограниченный температурный режим
- Б) работа не с основными носителями
- В) необходимость низкого напряжения
- Г) необходимость вакуума

Вопрос № 54

К полупроводникам p-типа относится ...

- А) кристалл обладающий избытком концентрации электронов
- Б) полупроводник с избытком концентрации дырок
- В) рекомбинированный переход
- Г) кристаллическая решетка с избытком электронов

Вопрос № 55

Основное свойство полупроводникового диода:

- А) преобразовать постоянный ток в пульсирующий
- Б) пропускать ток в обратном направлении
- В) преобразовать постоянный ток в переменный
- Г) не пропускать постоянный ток

Вопрос № 56

Недостаток полевых транзисторов заключается в . . .

- А) изоляции затвора
- Б) низком быстродействии
- В) отсутствии эмиттера
- Г) отсутствии базы

Вопрос № 57

Какой из диодов изготавливают из полупроводниковых материалов с высокой концентрацией примесей?

- А) Фотодиод
- Б) Светодиод
- В) Туннельный диод
- Г) Варикап

Вопрос № 58

Основными параметрами выпрямительных полупроводниковых диодов является ..

- А) способность работать в мостиковой схеме
- Б) максимальная температура перехода
- В) площадь радиатора и рабочая температура
- Г) максимально допустимое обратное напряжение и прямой ток

Вопрос № 59

Электронно-дырочный переход это:

- А) n-n – переход
- Б) p-p – переход
- В) p-n – переход

Вопрос № 60

При обратном включении диода внешнее электрическое поле и диффузионное поле в p-n-переходе совпадают по направлению?

- А) Нет
- Б) Да

Вопрос № 61

Какую структуру имеет транзистор?

- А) n-p-n;
- Б) n-p-n-p;
- В) n-p;
- Г) p-n-p-n

Вопрос № 62

Какой вид тока на выходе диода, если он включен в электрическую цепь переменного тока?

- А) переменный непрерывный
- Б) переменный пульсирующий
- В) постоянный
- Г) синусоидальный

Вопрос № 63

Какую структуру имеет тиристор?

- А) p-n-p-n
- Б) n-p-n
- В) n-p-p-p
- Г) p-p-n-n

Вопрос № 64

Открытое состояние тиристора сохраняется, если сигнал на управляющей электроде отсутствует?

- А) Нет

Б) Да

Вопрос № 65

Какой режим работы транзистора необходимо обеспечить, если его использовать в логических схемах?

А) Ключевой

Б) Усилительный

В) Плавный

Г) Никакой

Вопрос № 66

Какой режим работы транзистора необходимо обеспечить, если его использовать в схемах усиления сигнала?

А) Никакой

Б) Ключевой

В) Плавный

Вопрос № 67

Сколько выводов имеет тиристор?

А) Четыре

Б) Один

В) Два

Г) Три

Вопрос № 68

Сколько выводов имеет транзистор?

А) Три

Б) Один

В) Два

Г) Четыре

Вопрос № 69

По какой схеме можно определить полный состав элементов и связей между ними, какого-либо устройства автоматики?

А) Принципиальная схема

Б) Функциональная схема

В) Алгоритмическая схема

Г) Структурная схема

Вопрос № 70

Какую функцию выполняет диодный мост в источниках питания?

А) Сглаживание

Б) Стабилизация

В) Выпрямление

Г) Понижение

Вопрос № 71

Какой элемент необходимо использовать в источниках питания для сглаживания пульсации выходного напряжения?

А) Стабилитрон

Б) Диод

В) Трансформатор

Г) Конденсатор

Вопрос № 72

Какую функцию выполняет стабилитрон в источниках питания?

А) Стабилизация

Б) Сглаживание

В) Выпрямление

Г) Понижение

Вопрос № 73

Компенсационный стабилизатор в источниках питания является системой по отклонению?

А) Нет

Б) Да

Вопрос № 74

Какой из логических элементов выполняет функцию дизъюнкция?

А) ИЛИ

Б) НЕ

В) И

Г) И-НЕ

Вопрос № 75

Какой элемент выполняет логическую функцию конъюнкция?

А) И-НЕ

Б) НЕ

В) ИЛИ

Г) И

Вопрос № 76

Какой прибор обозначен ?

А) Точечный диод

Б) СВЧ-диод

В) Выпрямительный диод

Г) Биполярный транзистор р-п-р

Вопрос № 77

Какой прибор обозначен ?

А) МДП транзистор с индуцированным n-каналом

Б) Фотодиод

В) Фотоэлемент

Г) Светодиод

Вопрос № 78

Какой фотоприбор состоит из химически чистого полупроводника?

А) Фоторезистор

Б) Фотоэлемент

В) Фотодиод

Г) Фотоэлектронный умножитель

Вопрос № 79

Какой фотоприбор наиболее точно оценит силу света?

А) Фоторезистор

Б) Фотоэлемент

В) Фотодиод

Г) Фототранзистор

Вопрос № 80

Какой слой в биполярном транзисторе имеет наименьшую толщину?

А) Эмиттер

Б) База

В) Коллектор

Г) Все слои одинаковы

Вопрос № 81

Напряжение между входами операционного усилителя...

- А) равно 0
- Б) больше 0
- В) меньше 0

Вопрос № 82

Амплитудно-частотной характеристикой усилителя называют зависимость...

- А) выходного сопротивления от частоты входного сигнала
- Б) входного сопротивления от частоты входного сигнала
- В) коэффициента усиления от частоты входного сигнала
- Г) выходной мощности от частоты входного сигнала

Вопрос № 83

Операционный усилитель работает с входными сигналами...

- А) напряжения
- Б) температурными
- В) токовыми
- Г) шумовыми

Вопрос № 84

Какую функцию выполняет диод в выпрямительных схемах?

- А) Вентили
- Б) Фильтра
- В) Смесителя

Вопрос № 85

Сопротивление резистора (постоянного сопротивления) измеряется в ...

- А) амперах
- Б) миллиамперах
- В) микрофарадах
- Г) килоомах

Вопрос № 86

Индуктивность катушки измеряется в ...

- А) милливольтгах
- Б) микрофарадах
- В) амперах
- Г) миллигенри

Вопрос № 87

Полупроводниковые приборы боятся ...

- А) увеличения температуры выше 70° С
- Б) низкого напряжения питания
- В) увеличения сопротивления нагрузки
- Г) вибрации

Вопрос № 88

Амплитудная модуляция это ...

- А) изменение фазы сигнала с помощью модулируемого сигнала
- Б) изменение амплитуды сигнала с помощью модулируемого сигнала
- В) изменение амплитуды с помощью частоты сигнала
- Г) изменение частоты с помощью амплитуды сигнала

Вопрос № 89

Какие диоды относятся к большой мощности?

- А) Ток ≤ 10 А
- Б) Ток < 10 А
- В) Ток > 10 А

Вопрос № 90

Какой логический элемент с пассивным выходом?

- А) Транзисторно-диодный
- Б) Транзисторный
- В) Диодный

Вопрос № 91

Какой элемент относится к фотоэлектрическому приемнику излучения?

- А) Светодиод
- Б) Фоторезистор

Вопрос № 92

Единица измерения индуктивности:

- А) Генри
- Б) Ом

Вопрос № 93

Единица измерения электрического сопротивления:

- А) Ампер
- Б) Генри
- В) Фарад
- Г) Ом

Вопрос № 94

Закон Ома:

- А) $I=UR$
- Б) $U=I/r$
- В) $R=I/R$
- Г) $U=IR$

Вопрос № 95

Входной ток операционного усилителя:

- А) $I_{вх}<0$
- Б) $I_{вх}= I_{вых}$
- В) $I_{вх}=0$
- Г) $I_{вх}= I_{вых}$

Вопрос № 96

Примеси, атомы которых отдают электроны называются...

- А) акцепторами
- Б) электронной примесью
- В) донорами
- Г) дырочной примесью

Вопрос № 97

Область в полевом транзисторе, через которую проходит поток основных носителей заряда, т.е. выходной ток, называется...

- А) истоком
- Б) каналом
- В) стоком
- Г) коллектором

Вопрос № 98

Выходы операционного усилителя имеют название:

- А) инвертирующий и неинвертирующий;
- Б) прямой и обратный;
- В) прямой и инвертный;
- Г) положительный и отрицательный

Вопрос № 99

Выходы триггера имеют название:

- А) инвертирующий и неинвертирующий
- Б) положительный и отрицательный:
- В) прямой и обратный
- Г) прямой и инвертный

Вопрос № 100

Для стабилизации рабочей точки усилительного каскада используют:

- А) повышение напряжения питания
- Б) введение отрицательной обратной связи по постоянному току
- В) увеличение сопротивления нагрузки

Эталоны правильных ответов:

№ вопроса	ответ	№ вопроса	ответ	№ вопроса	ответ	№ вопроса	ответ
1	Электроника	26	Б	51	В	76	В
2	А	27	Б	52	В	77	Б
3	Б	28	В	53	А	78	А
4	Б	29	Б	54	Б	79	Б
5	В	30	Г	55	В	80	Б
6	Г	31	А	56	Г	81	А
7	Г	32	В	57	А	82	В
8	Б	33	А	58	Г	83	В
9	А	34	В	59	В	84	А
10	А	35	Б	60	Б	85	Г
11	А	36	А	61	А	86	Г
12	Б	37	Г	62	Б	87	А
13	В	38	А	63	А	88	Б
14	В	39	А	64	Б	89	В
15	А	40	Б	65	А	90	В
16	Г	41	В	66	В	91	Б
17	А	42	А	67	Г	92	А
18	Б	43	Г	68	А	93	Г
19	А	44	В	69	Б	94	Г
20	В	45	Б	70	В	95	В
21	В	46	А	71	Г	96	В
22	А	47	В	72	А	97	Б
23	Г	48	А	73	Б	98	А
24	А	49	В	74	А	99	Г
25	В	50	Б	75	Г	100	Б

**Рефераттар мен баяндамалардың тақырыптары.
Тематика рефератов и докладов**

1. Полупроводниковые приборы.
2. Разновидности диодов.
3. Биполярные транзисторы.
4. Полевые транзисторы.
5. Тиристоры.
6. Оптоэлектронные приборы.
7. Интегральные микросхемы.
8. Усилители.
9. Операционные усилители.
10. Импульсные и цифровые устройства.
11. Электронные ключи.
12. Логические элементы.
13. Триггеры.
14. Выпрямители.
15. Фильтры.
16. Стабилизаторы.
17. Аналого-цифровые преобразователи.
18. Цифро-аналоговые преобразователи.
19. Использование вольт-амперной характеристики диода для определения его режима работы.
20. Классификация и система обозначений диодов.
21. Фотоприборы полупроводниковые.
22. Три схемы включения транзистора с ненулевым сопротивлением нагрузки.
23. Графический анализ схем с полевыми транзисторами.
- МДП-транзистор со встроенным и МДП-транзистор с индуцированным каналом. Ячейка памяти на основе полевого транзистора с изолированным затвором (флеш-память).
24. Различные усилители на биполярных транзисторах. Знать характеристики, параметры, режимы работы усилительных каскадов.
25. Различные усилители на основе ОУ.
26. Импульсный режим работы электронных устройств. Электронные ключи.
27. Электрические генераторы импульсов.
28. Схемы логических элементов. Комбинационные устройства.
29. Триггеры на основе логических элементов.
30. Неуправляемые выпрямители.
31. Управляемые выпрямители.

32. Фильтры сглаживающие. Импульсные стабилизаторы.

Қорытынды бақылауға арналған сұрақтар
Вопросы для итогового контроля

1. Полупроводниковые диоды. Характеристики и параметры. Прямое и обратное включение р-n-перехода. Емкости р-n-перехода.
2. Разновидности полупроводниковых диодов. Система обозначений.
3. Биполярные транзисторы. Устройства и физические процессы
4. Характеристики биполярных транзисторов.
5. Схемы включения биполярного транзистора.
6. Полевые транзисторы. Устройства и физические процессы.
7. Инверсное включение полевого транзистора.
8. Частотные (динамические) свойства полевого транзистора.
9. Полевые транзисторы и изолированным затвором.
10. МДП-транзисторы.
11. Ячейка памяти на основе полевого транзистора с изолированным затвором (флеш-память).
12. Тиристоры.
13. Оптоэлектронные приборы. Общая характеристика.
14. Светодиоды
15. Фоторезисторы. Фотодиоды. Фототранзисторы. Фототиристоры.
16. Оптопары.
17. Индикаторы.
18. Лазеры.
19. Интегральные микросхемы.
20. Цифровые интегральные микросхемы.
21. Аналоговые интегральные микросхемы.
22. Интегральные транзисторы и полупроводниковые диоды.
23. Интегральные конденсаторы и резисторы.
24. Классификация микросхем по функциональному признаку.
25. Усилители. Основные параметры и характеристики.
26. Три основные схемы усилителей на биполярных транзисторах.
27. Показатели усилителей на биполярных транзисторах.
28. Усилители на полевых транзисторах.
29. Режимы работы усилительных каскадов.
30. Усилители мощности.
31. Усилители постоянного тока.
32. Обратные связи в усилителях.
33. Операционный усилитель (ОУ).

34. Инвертирующий и неинвертирующий ОУ.
35. Дифференциальный усилитель на основе ОУ.
36. Ограничители и интеграторы на основе ОУ.
37. Аналоговые перемножители.
38. Импульсный режим работы электронных устройств.
39. Импульсные и цифровые устройства.
40. Цифровое представление преобразуемой информации и логические состояния.
41. Основные логические операции.
42. Электрические схемы логических элементов.
43. Электронные ключи на биполярных и полевых транзисторах.
44. Комбинационные устройства. Дешифратор. Мультиплексор. Сумматор.
45. Триггеры. Основные характеристики. Схемы.
46. Счетчики и регистры.
47. Формирователи импульсов.
48. Программируемые логические матрицы.
49. Преобразовательные устройства.
50. Неуправляемые выпрямители.
51. Управляемые выпрямители.
52. Сглаживающие фильтры.
53. Стабилизаторы.
54. Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи

**ПАЙДАЛАНҒАН ЭДЕБИЕТ
ИСПОЛЬЗУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА**

Основная литература

1. Криштафович А.К., Трифонюк В.В., Основы промышленной электроники М, Высшая школа, 2005 г.
2. Основы промышленной электроники (под редакцией Герасимова В.В.) М., Высшая школа 2006 г.
3. Федотов В.И., Основы электроники, М, Высшая школа 2000 г.

Дополнительная литература

4. Электротехника и электроника: иллюстрированное учебное пособие / Под ред. Бутырина П.А.. - М.: Academia, 2018. - 892 с.
5. Электротехника и электроника / Под ред. Петленко Б.И.. - М.: Academia, 2017. - 31 с.
6. Плакаты: Электротехника и электроника. Иллюстрированное учеб. пособие. / Под ред. Бутырина П.А.. - М.: Academia, 2017. - 352 с.
7. Информационно-измерительная техника и электроника / Под ред. Раннева Г.Г.. - М.: Academia, 2010. - 448 с.

Средства обучения:

1. Технические средства обучения (компьютер, проектор, видеотехника).
2. Макеты.
3. Плакаты.

