

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БАШКИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

И.Р. КАФИЕВ, Р.З. ШАЯХМЕТОВ, М.Л. ПЕТРОВ,  
С.П. ПОКШУБИН

## **ЭЛЕКТРОНИКА**

Конспект лекций

Уфа  
Издательство БашГАУ  
2015

УДК 621.38(042.4)  
ББК 32.85я7  
К30

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом Башкирского ГАУ

Авторы: Кафиев И.Р., Шаяхметов Р.З., Петров М.Л.,  
Покшубин С.П.

Рецензенты:

Уфимский государственный университет экономики и сервиса, д.т.н., профессор кафедры «Машины, аппараты, приборы и технологии сервиса» Яруллин Р.Б.

Башкирский государственный аграрный университет, к.т.н., доцент кафедры «Электроснабжение и применение электрической энергии в сельском хозяйстве» Яковлев С. М.

К30      **Электроника:** конспект лекций / И.Р. Кафиев, Р.З. Шаяхметов, М.Л. Петров, С.П.Покшубин. - Уфа: БашГАУ, 2015. -190 с.

ISBN 978-5-7456-0445-4

В конспекте лекций рассмотрены основные элементы современных электронных устройств, даны необходимые сведения по физическим явлениям, используемым в работе полупроводниковых приборов, и приведены схемы наиболее применяемых аналоговых, импульсных и цифровых устройств.

Конспект лекций предназначен для студентов, изучающих дисциплину «Электроника» в рамках подготовки бакалавров по направлению «Агроинженерия». Может быть рекомендован студентам, обучающимся по направлению подготовки «Теплоэнергетика и теплотехника».

УДК 621.38(042.4)  
ББК 32.85я7

ISBN 978-5-7456-0445-4

© Кафиев И.Р., Шаяхметов Р.З.,  
Петров М.Л., Покшубин С.П., 2015  
© Башкирский государственный  
аграрный университет, 2015

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	6
ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА СОВРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ.....	10
1.1 Общие сведения о полупроводниках.....	10
1.2 Полупроводниковые диоды.....	14
1.3 Биполярные транзисторы .....	20
1.4 Полевые транзисторы.....	25
1.5 Силовые транзисторы .....	29
1.6 Тиристоры.....	33
1.7 Оптоэлектронные приборы.....	37
1.7.1 Излучающий диод.....	38
1.7.2 Фоторезистор.....	41
1.7.3 Фотодиод.....	42
1.7.4 Оптрон, фототранзистор и фототиристор.....	44
1.8 Интегральные микросхемы.....	46
2 АНАЛОГОВЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА.....	49
2.1 Усилители.....	49
2.1.1 Классификация, основные характеристики и параметры усилителей.....	49
2.1.2 Обратная связь в усилителях.....	55
2.1.3 Усилители на биполярных транзисторах....	56
2.1.4 Схемы включения усилительных каскадов...	60
2.1.5 Классы работы усилителей .....	64
2.1.6 Усилители на полевых транзисторах.....	67
2.1.7 Многокаскадные усилители.....	68
2.1.8 Усилители постоянного тока.....	69
2.1.9 Усилители мощности.....	72
2.2 Операционные усилители.....	74
2.2.1 Условное обозначение, основные характеристики и параметры.....	74
2.2.2 Линейные схемы на основе операционных усилителей.....	79
2.3 Электронные фильтры.....	86
2.3.1 Общие сведения.....	86
2.3.2 Классификация фильтров.....	87
2.4 Генераторы гармонических колебаний.....	87

2.4.1	Назначение, структурная схема и условие возбуждения.....	92
2.4.2	Генератор с фазосдвигающей цепью.....	95
2.4.3	Генератор с мостом Вина.....	96
2.4.4	Генератор с двойным Т-образным мостом.....	98
3	ИСТОЧНИКИ ВТОРИЧНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ..	102
3.1	Выпрямители.....	103
3.1.1	Однофазные выпрямители .....	104
3.1.2	Трёхфазные выпрямители.....	108
3.1.3	Сглаживающие фильтры.....	111
3.2	Стабилизаторы напряжения.....	114
3.2.1	Параметрические стабилизаторы.....	115
3.2.2	Компенсационные стабилизаторы напряжения.....	117
4	ИМПУЛЬСНЫЕ УСТРОЙСТВА.....	122
4.1	Параметры импульсного сигнала.....	122
4.2	Простейшие формирователи импульсных сигналов и триггер Шмитта.....	124
4.3	Электронные ключи.....	127
4.4	Генераторы импульсных сигналов.....	130
4.4.1	Генераторы прямоугольных импульсов.....	131
4.4.2	Генераторы линейно изменяющегося напряжения.....	136
5	ЦИФРОВЫЕ УСТРОЙСТВА.....	141
5.1	Логические операции и алгебра логики.....	141
5.2	Комбинационные цифровые устройства.....	146
5.3	Последовательностные цифровые устройства.....	153
5.4	Цифровые запоминающие устройства.....	160
5.5	Устройства аналого-цифрового преобразования сигналов.....	163
5.5.1	Цифроаналоговые преобразователи.....	163
5.5.2	Аналого-цифровые преобразователи.....	165
6	МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ УСТРОЙСТВА.....	171
6.1	Назначение, классификация, функции микропроцессоров.....	171
6.2	Структура и принцип работы микропроцессорного устройства.....	173
6.3	Арифметико-логическое устройство.....	177

ПРИЛОЖЕНИЕ А Система обозначений диодов.....	182
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Система обозначений транзисторов..	185
ПРИЛОЖЕНИЕ В Система обозначений тиристорov....	188
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Система обозначений интегральных микросхем.....	189
РЕКОМЕНДОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА .....	190

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Конспект лекций написан в соответствии с рабочей программой дисциплины «Электроника» для бакалавров по направлениям подготовки «Агроинженерия». Может быть рекомендован студентам, обучающимся по направлению подготовки «Теплоэнергетика и теплотехника».

В конспекте учебный материал изложен в следующей последовательности: элементы современных электронных устройств (полупроводниковые диоды, транзисторы, тиристоры, оптоэлектронные приборы, интегральные микросхемы), аналоговые устройства (электронные усилители, электронные фильтры, генераторы синусоидальных колебаний), источники вторичного электропитания (выпрямители, сглаживающие фильтры, стабилизаторы напряжения постоянного тока), импульсные электронные устройства (электронные ключи, генераторы импульсных сигналов) и устройства цифровой электроники (логические элементы, комбинационные и последовательностные устройства, устройства аналогоцифрового и цифро-аналогого преобразования, устройства памяти).

Конспект лекций не претендует на то, чтобы стать заменой учебников по электронике, однако, он может облегчить усвоение учебного материала. Основная задача авторов заключается в том, чтобы просто и ясно при умеренном объеме изложить материал по указанным вопросам.

## ВВЕДЕНИЕ

Электроника – область науки и техники, связанная с исследованием, разработкой и производством электронных устройств и принципов их использования. Она является универсальным и эффективным средством для решения самых различных проблем в области сбора и обработки информации, автоматического управления и преобразования энергии. Знания в области электроники становятся необходимыми все более широкому кругу специалистов.

Электроника имеет короткую, но богатую событиями историю, которая составляет чуть более 100 лет. Первый ее период связан с эпохой вакуумных ламп и с появлением чуть позже ионных приборов. На этой основе были разработаны электронные устройства, а затем долгие годы их совершенствовали. Эти устройства характеризовались большой потребляемой мощностью, низкой надёжностью, громоздкостью реализации и сложностью эксплуатации. В настоящее время электровакуумные и газоразрядные приборы имеют ограниченное применение в электронике.

Дальнейшему развитию электроники способствовало создание в конце 40-х годов первых полупроводниковых элементов (диодов и транзисторов). Применение транзисторов позволило на определенном этапе значительно повысить надёжность, уменьшить потребляемую мощность, габариты, а также затраты на производство и эксплуатацию электронной аппаратуры.

Начиная с 70-х годов большая часть электронной аппаратуры стала производиться на интегральных микросхемах. Современный этап развития информационной электроники характеризуется широким использованием компонентов микроэлектроники, включая большие интегральные схемы.

Электронными устройствами называют совокупность электронных элементов, конструкций, монтажных соединений, объединенных в единое целое.

Различают следующие виды электронных устройств:

- аналоговые – устройства, работающие с сигналами, изменяющимися по закону непрерывной функции. Примерами данных устройств являются: аппаратура связи, измерительные приборы, системы контроля и т.д.;
- импульсные – устройства, работающие с сигналами, изменяющимися по закону дискретной функции. Примерами этих устройств

являются импульсные сварочные агрегаты, радиоуправляемые системы и т.п.;

- цифровые – устройства, работающие с сигналами, изменяющимися по закону двоичной функции. Примерами указанных устройств являются: ЭВМ, цифровые телевизоры, цифровые узлы измерительных приборов и т.п.

Электроника в наше время проникла во все области человеческой деятельности.

В промышленности электронные устройства используются в электроприводах станков, насосов, нагревательных технологических систем и т.д. В электроснабжении нашли применение электронные компенсаторы реактивной мощности, распределительно-коммутирующие устройства, стабилизаторы и др. В транспорте используются электронные системы управления сервисными механизмами электропоездов, электромобилей и т.д. В быту электронные устройства используются в холодильниках, кондиционерах, электропечах, освещении и вентиляции и т.п. В сельском хозяйстве электронные устройства используются для зарядки аккумуляторных батарей машин и тракторов, в системе зажигания сельскохозяйственных машин и т.п.

Основными тенденциями развития электроники являются:

- миниатюризация (уменьшение размеров) электронных устройств;

- совершенствование элементной базы, характеристик, качества, расширение функций, выполняемых электронными приборами.

Основным показателем совершенства электронной аппаратуры является плотность компоновки, т. е. количество элементов схемы в  $1 \text{ см}^3$  действующего устройства. Если, например, основным элементом электронного устройства являются лампы, то можно достигнуть плотности  $0,3 \text{ эл/см}^3$ . С учетом этого для размещения современной ЭВМ потребуется объем в несколько тысяч кубических метров. Кроме того, нужна мощная энергетическая установка для питания такой машины.

Создание в конце 40-х годов диодов и транзисторов привело к появлению нового принципа конструирования электронной аппаратуры — модульного. Основой при этом является элементарная ячейка-модуль, стандартный по размерам, способу сборки и монтажу. При этом плотность компоновки возросла до  $2,5 \text{ эл/см}^3$ .

Дальнейшее совершенствование полупроводниковых приборов, резисторов, конденсаторов и других элементов, уменьшение их размеров привели к созданию микромодулей. Плотность компоновки при этом превышала  $10 \text{ эл/см}^3$ . Микромодули завершили десятилетнюю эпоху транзисторной электроники и привели к возникновению интегральной электроники или микроэлектроники.

В схемотехническом отношении интегральная электроника часто не отличается от транзисторной, так как в интегральной схеме можно выделить все элементы принципиальной схемы устройства, но размеры этих элементов очень малы (примерно  $0,05\text{—}1 \text{ мкм}$ ). Технология изготовления интегральных схем позволила резко повысить плотность компоновки, доведя ее до миллионов и более элементов в  $1 \text{ см}^3$ .

Современная микроэлектроника вплотную приблизилась к предельным технологическим размерам. Например, толщина окисла составляет несколько десятков атомных слоев. Дальнейшее уменьшение размеров транзисторов становится все более проблематичным, поэтому многие компании активно занимаются разработкой альтернативных технологий.

На сегодня существуют два кандидата на роль материала для новых некремниевых транзисторов: углеродные нанотрубки и графен (открыты А. К. Геймом и К. С. Новосёловым в 2004 году, им была присуждена Нобелевская премия по физике за 2010 год). Углеродные нанотрубки, которые также называют фуллеренами или углеродными каркасными структурами, — это большие молекулы, состоящие только из атомов углерода. Принято даже считать, что эти молекулы представляют собой новую форму углерода, наряду с известными формами — графитом и алмазом. В 1991 г. были открыты новые фуллерены, напоминающие длинные цилиндрические каркасные формы, — их называли нанотрубками. В поперечном сечении их размер обычно составляет несколько нм, в то время как по длине они могут достигать гигантских размеров — вплоть до нескольких мм.

Другим материалом, который исследуется в настоящее время, является графен, по сути, пленка углерода толщиной в один атом, имеющая строго упорядоченную гексагональную кристаллическую структуру. Таким образом, графен можно считать развернутой в плоскость одностенной нанотрубкой, или двумерным фуллереном, или же отдельно взятым атомарным слоем из множества таких слоев, составляющих кристалл графита.

# 1 ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА СОВРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

## 1.1 Общие сведения о полупроводниках

Для понимания физических процессов, лежащих в основе работы полупроводниковых приборов, необходимо рассмотреть электрические свойства некоторых полупроводниковых материалов.

Полупроводники – это материалы, которые по своей электропроводимости занимают среднее положение между проводниками и диэлектриками.

Основное их свойство – высокая чувствительность к внешнему воздействию ( $t^\circ$ , свету) и примесям.

Основными исходными полупроводниковыми материалами, из которых изготавливаются полупроводниковые приборы, являются:

Si – кремний и его соединения (для большей части *n-n* приборов);

Ge – германий и его соединения;

Ga – галлий и его соединения;

In – индий и его соединения.

Наибольшее применение в технологии изготовления полупроводниковых приборов получили такие элементы, как Si и Ge. Кремний был открыт в 1828 году, германий в 1886 году. Эти химические элементы имеют на внешней оболочке атомов по четыре валентных электрона (которые находятся на незаполненной внешней оболочке и являются слабо связанными).

Полупроводниковые материалы, применяемые в технике полупроводников, имеют весьма совершенную кристаллическую решетку.

Решетки германия и кремния имеют структуру алмазного типа и показаны на рисунке 1.1.

Кристаллическая решетка такого типа называется тетраэдрической решеткой или решеткой типа алмаза. Она характерна для всех четырехвалентных элементов. Расстояние между атомами в такой решетке одинаковое. Четыре электрона каждого атома связаны с такими же электронами соседних атомов посредством ковалентной связи (рисунок 1.2).

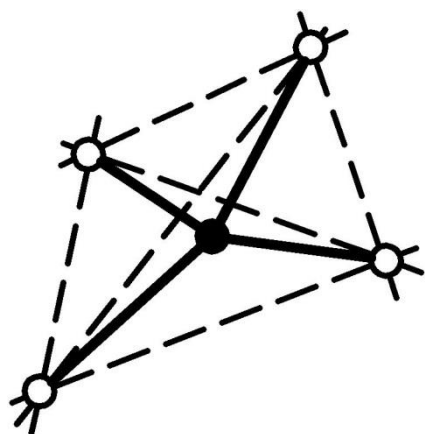


Рисунок 1.1 Решетки германия и кремния

В полупроводниках, как и в металлах,

электрический ток осуществляется движением электронов. Однако условия и характер проводимости имеют особенности.

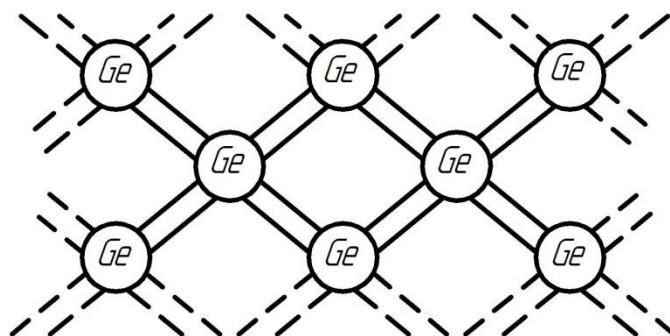


Рисунок 1.2 Структура кристаллической решетки чистого германия при температуре абсолютного нуля

При температурах выше абсолютного нуля некоторые валентные электроны имеют энергию, достаточную для их отрыва от атомов.

Эти сравнительно немногочисленные электроны, отрываясь от своих атомов, становятся свободными (рисунок 1.3). Теряя электроны, атомы превращаются в ионы, каждый из таких ионов окружен большим количеством нейтральных ионов, которые, находясь в непосредственной близости к иону, могут легко отдавать ему электроны, нейтрализуя его, но сами превращаются в ион.

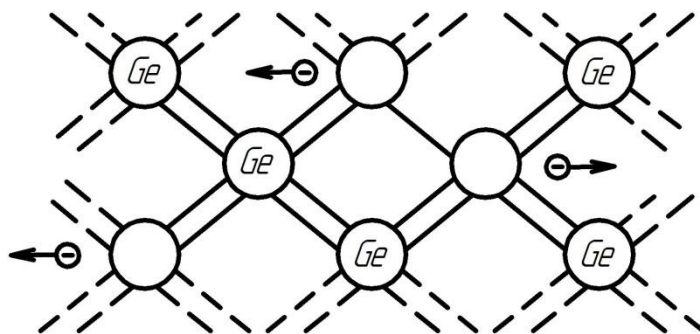


Рисунок 1.3 Образование подвижных носителей заряда при температуре выше абсолютного нуля

Обмен электронами между ионами и нейтральными атомами приводит к тому, что местоположение иона в полупроводнике меняется, т.е. дело обстоит так, что как будто перемещается положительный заряд.

Таким образом, наряду с перемещением свободных электронов, в полупроводнике может происходить процесс, имеющий характер перемещения положительных зарядов.

Пока в полупроводнике не действует внешнее электрическое поле, оба эти процесса имеют хаотический характер. В поле это перемещение носит направленный характер, происходит преимущественно по направлению поля, т.е. создает электрический ток.

Дыркой называется место полупроводника, где вместо нейтрального атома образовался положительный ион.

Проводимость полупроводника, обусловленная существованием свободных электронов и дырок, называется собственной проводимостью.

Встречаясь с дыркой, свободный электрон может воссоединиться с положительным ионом. При этом свободный электрон и дырка исчезают. Этот процесс называется рекомбинацией.

Рекомбинацией называется процесс воссоединения свободных электронов и дырок, в результате чего исчезает пара носителей заряда.

В идеально чистом проводнике без примесей каждому освобожденному (тепловым движением или светом) электрону соответствовало бы образование одной дырки, т.е. число участвующих в создании тока собственной проводимости электронов и дырок было бы одинаково. При температуре  $300^0\text{ К}$  в одном кубическом сантиметре чистого германия содержится  $2,5 \cdot 10^{13}$  свободных электронов. Хотя общее число свободных электронов достаточно велико, доля ионизированных атомов при комнатной температуре очень мала. Известно, что в одном кубическом сантиметре германия имеется  $4,4 \cdot 10^{22}$  атомов. Таким образом, ионизированные атомы составляют менее одной миллиардной части от общего числа атомов. Это обстоятельство обуславливает низкую проводимость чистого кристалла германия.

Проводимость кристалла германия или кремния можно значительно увеличить путем введения в него небольшого количества примеси. Если в расплавленный германий ввести небольшое количество пятивалентного элемента, например, мышьяка, то при остывании образуется кристалл, в котором на месте некоторых атомов германия окажутся атомы мышьяка (рисунок 1.4).

Каждый атом мышьяка образует четыре ковалентные связи с соседними атомами германия, а еще один его электрон оказывается лишним. Этот электрон может свободно перемещаться в кристалле, увели-

чивая его проводимость. При этом атом мышьяка приобретает положительный заряд.

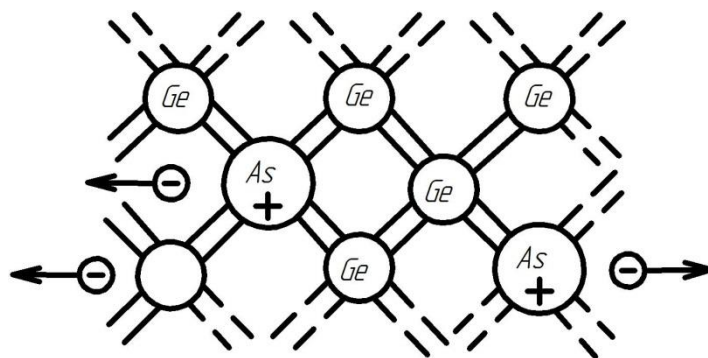


Рисунок 1.4 Образование подвижных электронов в германии с примесью мышьяка

Таким образом, почти каждый введенный в германий атом мышьяка создаст один свободный электрон. Число дырок в этом случае не увеличивается, потому что оставшийся ион мышьяка прочно связан с 4-мя своими соседями двойными связями и переход электронов от соседних нейтральных атомов к иону мышьяка невозможен.

Если даже количество введенного мышьяка будет мало, то примесь даст примерно в 1000 раз больше дополнительных электронов, чем в чистом германии, но не увеличит числа дырок. В таком полупроводнике свободные электроны являются основными, т.к. их большинство, а дырки – не основными.

Полупроводники, в которых основными носителями зарядов являются электроны, называются полупроводниками *n*-типа (электронными полупроводниками).

Другое положение получается, если в кристалл германия ввести трехвалентную примесь, например, бор. Атом бора, имеющий на одну валентную связь меньше, забирает у соседнего атома германия электрон, создавая свободную связь, т. е. дырку. При этом атом примеси получает дополнительный отрицательный заряд (рисунок 1.5).

Введенная в германий примесь бора не увеличивает число свободных электронов. Дырки в нем являются основными, а электроны – не основными.

Полупроводники, в которых основными носителями зарядов являются дырки, называются полупроводниками *p*-типа (дырочные полупроводники).

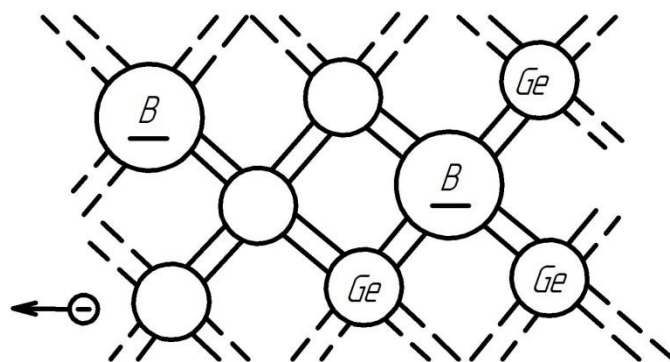


Рисунок 1.5 Образование дырок в германии с примесью бора

Для ионизации атомов примеси требуется затрата некоторой энергии. Однако эта энергия весьма мала, и практически все атомы примеси оказываются ионизированными уже при комнатной температуре. Поэтому даже небольшое количество примеси сильно изменяет проводимость кристалла.

Далее рассмотрим условные обозначения, принцип работы, параметры и характеристики современных полупроводниковых приборов.

## 1.2 Полупроводниковые диоды

Полупроводниковым диодом называется полупроводниковый прибор с одним выпрямляющим электрическим переходом, имеющим два вывода.

Структура полупроводникового диода с электронно-дырочным переходом и его условное графическое обозначение приведены на рисунке 1.6.

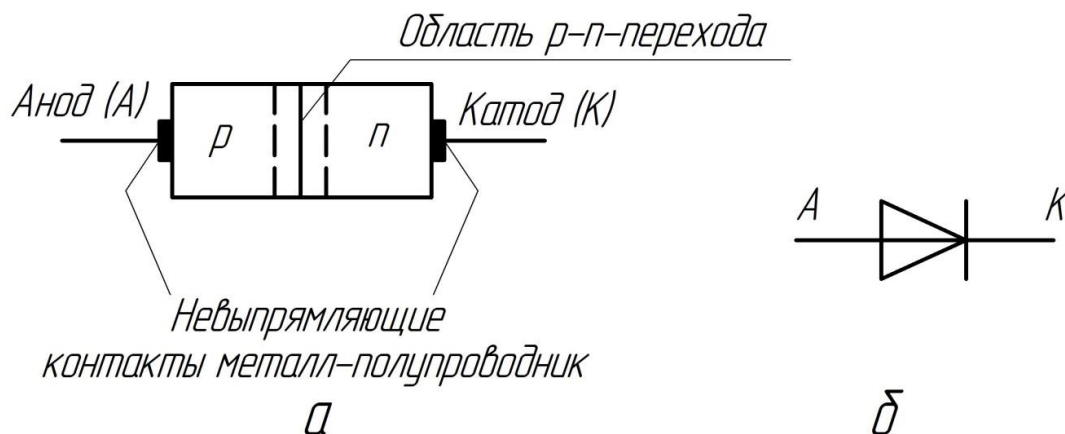


Рисунок 1.6 Полупроводниковые диоды:  
а – схема структуры; б - графическое обозначение

Буквами  $p$  и  $n$  обозначены слои полупроводника с проводимостями соответственно  $p$ -типа и  $n$ -типа. В контактирующих слоях полупроводника (область  $p$ - $n$ -перехода на рисунке 1.6) имеет место диффузия дырок из слоя  $p$  в слой  $n$ , причиной которой является то, что их концентрация в слое  $p$  значительно больше их концентрации в слое  $n$ . В итоге в приграничных областях слоя  $p$  и слоя  $n$  возникает так называемый 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 некомпенсированные объемные заряды, создающие электрическое поле с напряженностью  $E$ . Это поле препятствует переходу дырок из слоя  $p$  в слой  $n$  и переходу электронов из слоя  $n$  в слой  $p$ . Оно создает так называемый дрейфовый поток подвижных носителей заряда, перемещающий дырки из слоя  $n$  в слой  $p$  и электроны из слоя  $p$  в слой  $n$ . Таким образом, в зависимости от полярности проходящего через диод тока, проводимость диода существенно изменяется, приводя к изменению величины проходящего тока.

Основные характеристики полупроводникового диода представляются его вольт-амперной характеристикой (ВАХ). Вольт-амперная характеристика – это зависимость тока  $i$ , протекающего через диод, от напряжения  $u$ , приложенного к диоду. Вольт-амперной характеристикой называют и график этой зависимости (рисунок 1.7).

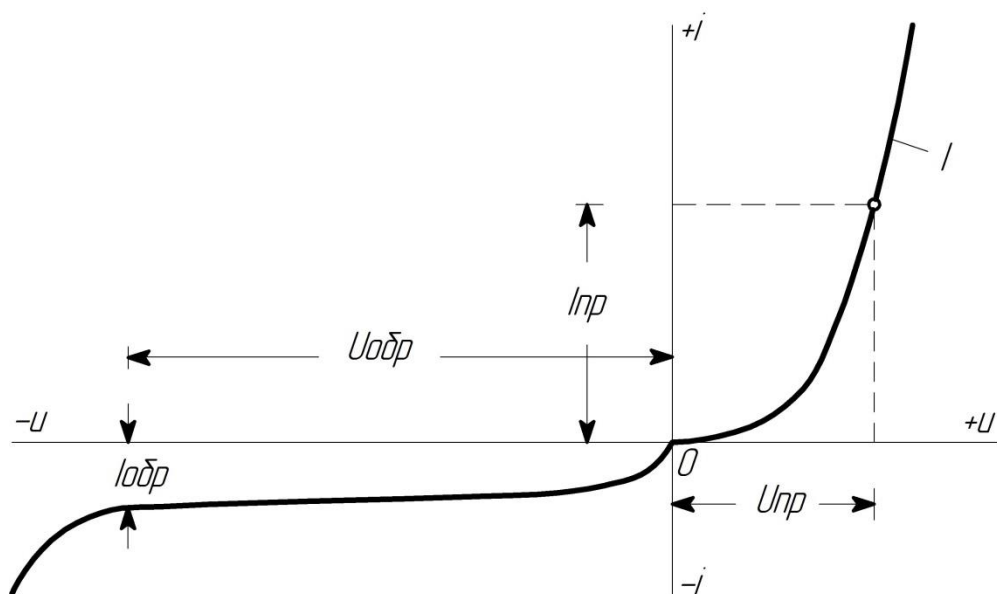


Рисунок 1.7 Вольт-амперная характеристика и основные параметры полупроводникового диода

Диоды обычно характеризуются следующими параметрами (рисунок 1.7):

- обратным током при некоторой величине обратного напряжения  $I_{обр}, мкА$ ;
- падением напряжения на диоде при некотором значении прямого тока через диод  $U_{пр}, в$ ;
- емкостью диода при подаче на него обратного напряжения некоторой величины  $C, пФ$ ;
- диапазоном частот, в котором возможна работа без снижения выпрямленного тока  $f_{зр}, кГц$ ;
- рабочим диапазоном температур.

Техническими условиями задаются обычно максимальные (или минимальные) значения параметров для диодов каждого типа. Так, например, задается максимально возможное значение обратного тока, прямого падения напряжения и емкости диода. Диапазон частот задается минимальным значением граничной частоты  $f_{зр}$ . Это значит, что параметры всех диодов не превышают (а в случае частоты – не ниже) заданного техническими условиями значения.

**Стабилитрон.** Это полупроводниковый диод, сконструированный для работы в режиме электрического пробоя. Условное графическое обозначение стабилитрона представлено на рис. 1.8, а.

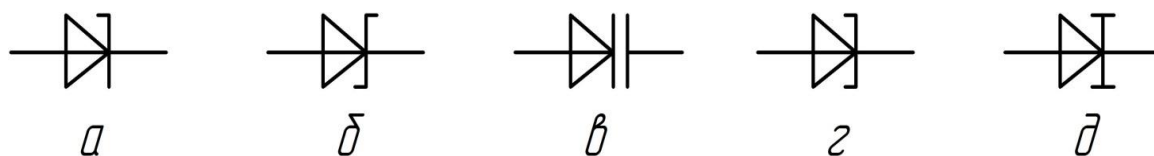


Рисунок 1.8 Графическое изображение полупроводниковых диодов: а- стабилитрон; б- диод Шоттки; в- варикап; г - туннельный диод; д- обращенный диод

В указанном режиме при значительном изменении тока стабилитрона напряжение изменяется незначительно, т. е. стабилитрон стабилизирует напряжение. ВАХ кремниевого стабилитрона Д814Д представлена на рисунке 1.9.

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.

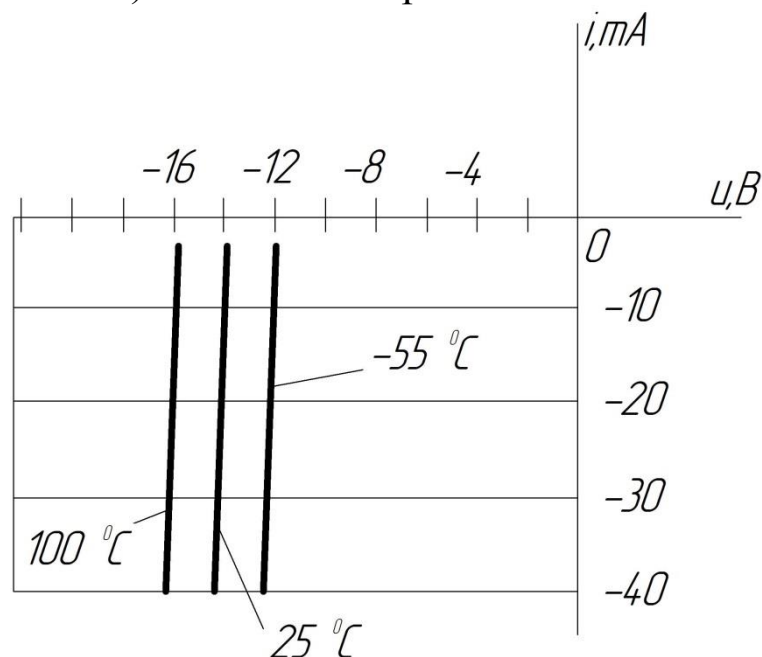


Рисунок 1.9 Вольт-амперная характеристика кремниевого стабилитрона Д814Д

Основными являются следующие параметры стабилитрона:

$U_{ст}$  – напряжение стабилизации (при заданном токе в режиме пробоя);

$I_{ст.мин}$  – минимально допустимый ток стабилизации;

$I_{ст.макс}$  – максимально допустимый ток стабилизации;

$r_{ст}$  – дифференциальное сопротивление стабилитрона (на участке пробоя),  $r_{ст} = du / di$  ;

$\alpha_{U_{ст}}$  – температурный коэффициент напряжения стабилизации (ТКН).

Величины  $U_{ст}$ ,  $I_{ст.мин}$  и  $I_{ст.макс}$  принято указывать как положительные.

Стабилитрон является быстродействующим прибором и хорошо работает в импульсных схемах.

**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.

В диоде Шоттки используется не  $p$ - $n$ -переход, а выпрямляющий контакт металл-полупроводник. Условное графическое обозначение диода Шоттки представлено на рисунке 1.8, б.

В обычных условиях прямой ток, образованный электронами зоны проводимости, переходящими из полупроводника в металл, имеет очень малую величину. Это является следствием недостатка электронов, энергия которых позволила бы им преодолеть данный барьер.

Для увеличения прямого тока необходимо «разогреть» электроны в полупроводнике, поднять их энергию. Такой разогрев может быть осуществлен с помощью электрического поля.

Если подключить источник внешнего напряжения плюсом к металлу, а минусом к полупроводнику  $n$ -типа, то потенциальный барьер понизится и через переход начнет протекать прямой ток. При противоположном подключении потенциальный барьер увеличивается и ток оказывается весьма малым.

Диоды Шоттки – очень быстродействующие приборы, они могут работать на частотах до десятков гигагерц ( $1 \text{ ГГц} = 1 \cdot 10^9 \text{ Гц}$ ). 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.

**Варикап** - это полупроводниковый диод, предназначенный для работы в качестве конденсатора, емкость которого управляется напряжением. Условное графическое обозначение варикапа представлено на рисунке 1.8, в.

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.

**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 ВАХ участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Условное графическое обозначение диода представлено на рисунке 1.8, г.

Для примера изобразим (рисунок 1.10) прямую ветвь ВАХ германиевого туннельного усилительного диода 1И104А ( $I_{пр.макс} = 20 \text{ мА}$  –

постоянный прямой ток,  $U_{обр.макс}=20\text{ мВ}$ ), предназначенного для усиления в диапазоне волн  $2...10\text{ см}$  (это соответствует частоте более  $1\text{ ГГц}$ ).

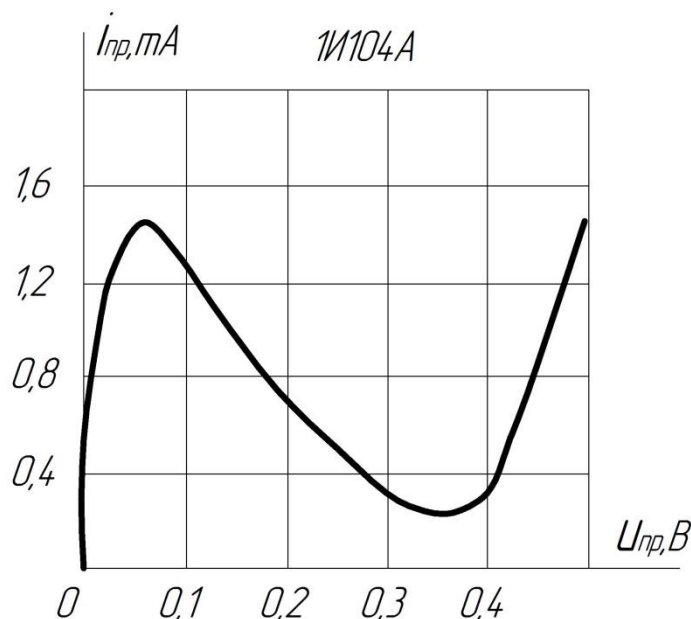


Рисунок 1.10 ВАХ германиевого туннельного диода

Общая емкость диода в точке минимума характеристики составляет  $0,8...1,9\text{ пФ}$ . Полезно отметить, что проверка диода тестером не допускается. Туннельные диоды могут работать на очень высоких частотах – более  $1\text{ ГГц}$ .

Наличие участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением на ВАХ 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.

**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 ВАХ обращенного диода отсутствует или очень слабо выражен.

Обратная ветвь ВАХ 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.

Условное графическое обозначение обращенного диода представлено на рисунок 1.8, д.

Рассмотрим для примера ВАХ германиевого обращенного диода 1И401А (рисунок 1.11), предназначенного, кроме прочего, для работы в импульсных устройствах (постоянный прямой ток – не более 0,3 мА, постоянный обратный ток – не более 4 мА (при  $t \leq 35^\circ \text{C}$ ), общая емкость в точке минимума ВАХ 1,2...1,5 пФ).

Как видно из графика (рисунок 1.11), обе ветви ВАХ практически симметричны (в зеркальном отражении) относительно начала координат. Участок отрицательного дифференциального сопротивления размещен на участке положительного напряжения между 0,1 В и 0,3 В. При этом амплитуда тока на участке с отрицательным дифференциальным сопротивлением не превышает 0,05 мА.

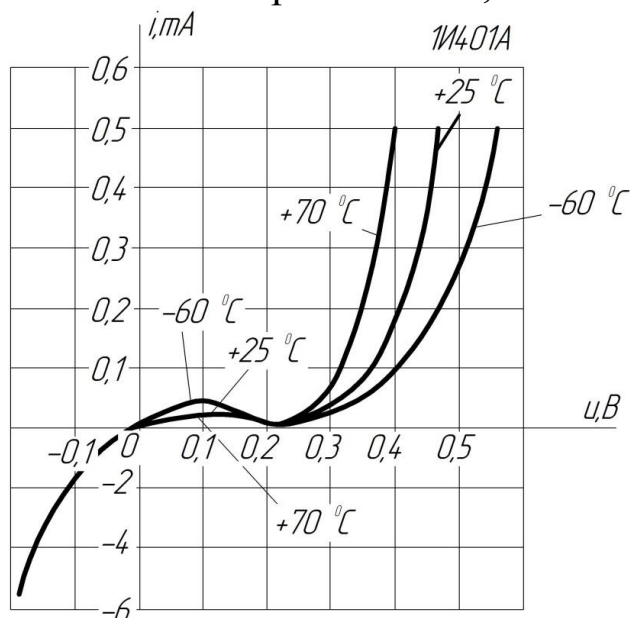


Рисунок 1.11 Вольт-амперная характеристика обращенного диода

### 1.3 Биполярные транзисторы

Биполярный транзистор – это полупроводниковый прибор с двумя  $p$ - $n$ -переходами, имеющий три вывода, в котором выходной ток управляется входным током. 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.

**Устройство транзистора.** Биполярный транзистор в своей основе содержит три слоя полупроводника ( $p-n-p$  или  $n-p-n$ ) и соответственно два  $p-n$  – 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.

На рисунке 1.12, *а* показано схематическое, упрощенное изображение структуры транзистора типа  $n-p-n$  и два допустимых варианта условного графического обозначения (рисунок 1.12, *б*). Кружок на схеме является символом корпуса транзистора. Кружок не ставится, если транзистор используется без корпуса, например, если транзистор входит в состав интегральной микросхемы.

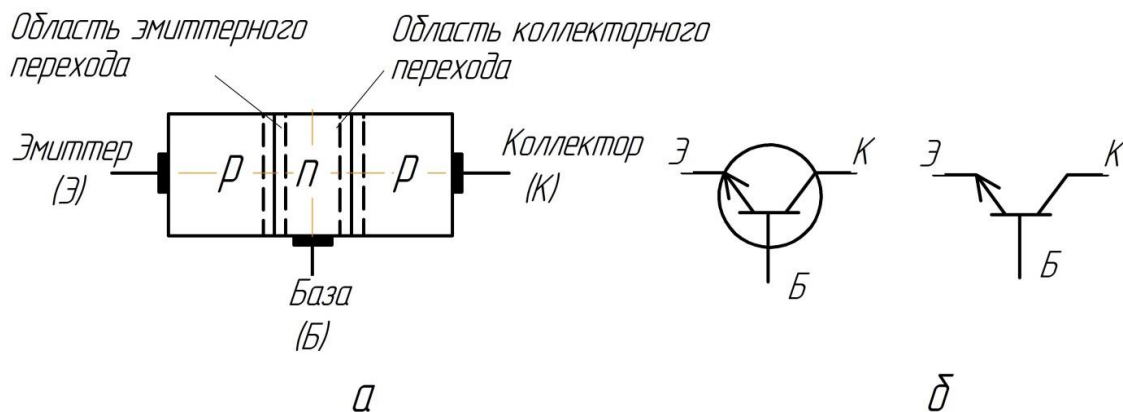


Рисунок 1.12 Биполярный транзистор типа  $n-p-n$ :  
*а* – структура; *б* - графическое обозначение

Транзистор  $p-n-p$  устроен аналогично, упрощенное изображение его структуры дано на рисунке 1.13, *а*. Более простой вариант условного графического обозначения – на рисунке 1.13, *б*.

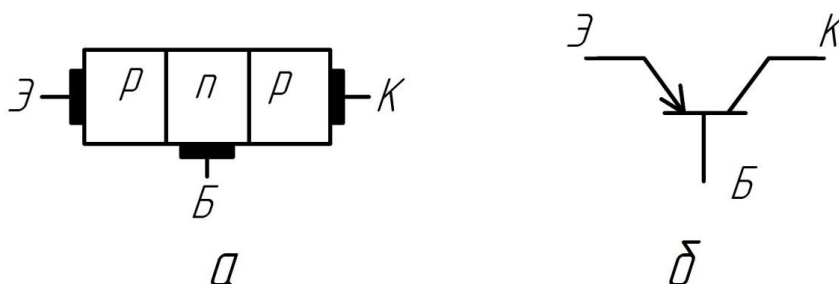


Рисунок 1.13 Биполярный транзистор типа  $p-n-p$ :  
*а* – структура; *б* - графическое обозначение

Транзистор называют биполярным, так как в процессе протекания электрического тока участвуют носители электричества двух знаков – электроны и дырки. Но в различных типах транзисторов роль электронов и дырок различна. Транзисторы типа  $n-p-n$  более распространены в сравнении с транзисторами типа  $p-n-p$ , так как обычно имеют лучшие параметры. Это можно объяснить тем, что основную роль в электрических процессах в транзисторах типа  $n-p-n$  играют электроны, а транзисторах типа  $p-n-p$  – дырки. Электроны же обладают подвижностью в два-три раза большей, чем дырки.

Важно отметить, что реально площадь коллекторного перехода значительно больше площади эмиттерного перехода, так как такая несимметрия значительно улучшает свойства транзистора.

**Количественные особенности структуры транзистора.** В основе работы биполярного транзистора типа  $n-p-n$  лежат те же физические процессы, которые рассмотрены при изучении полупроводникового диода. Особенности транзистора определяются особенностями его конструкции.

Основными элементами транзистора являются два соединенных  $p-n$  перехода. Это позволяет дать формальное представление структуры транзистора, показанное на рисунке 1.14. Для понимания принципа работы транзистора исключительно важно учитывать, что  $p-n$ -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 (рисунок 1.15).

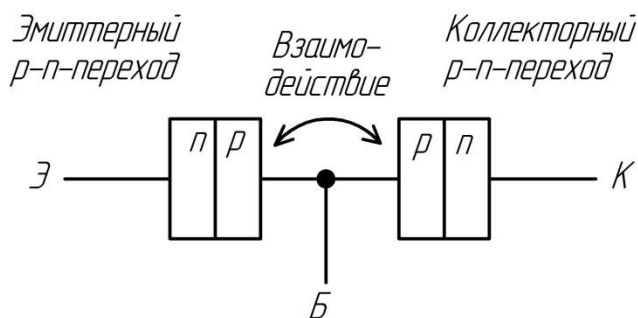


Рисунок 1.14 Структура транзистора

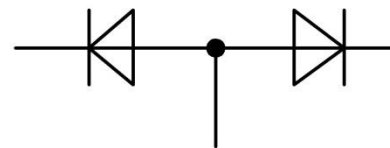


Рисунок 1.15 Схема с двумя диодами

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

Указанное взаимодействие имеет исключительно простую главную причину: очень малое расстояние между переходами транзи-

стора (от 20 – 30 мкм до 1 мкм и менее). Это расстояние называют толщиной базы. Именно эта количественная особенность структуры создает качественное своеобразие транзистора.

**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. Тогда через эмиттерный переход потечет ток  $I_э$ , который будет обеспечиваться главным образом инжекцией электронов из эмиттера в базу. Инжекция дырок из базы в эмиттер будет незначительна из-за указанного выше различия в концентрации атомов примесей.

Из-за малой толщины базы почти все электроны, пройдя базу, через так называемое время пролета достигают коллектора. Только малая доля электронов рекомбинирует в базе с дырками. Убыль этих дырок компенсируется протеканием тока базы  $I_б$ . Таким образом –  $I_б \ll I_э$ . Обратное смещение коллекторного перехода способствует тому, что электроны, подошедшие к нему, захватываются электрическим полем перехода и переносятся в коллектор. Таким образом, ток коллектора  $I_к$  лишь незначительно меньше тока эмиттера, т. е.  $I_к \approx I_э$ .

Основное свойство транзистора – способность к усилению сигнала базируется на существовании зависимости токов  $I_к$  и  $I_э$  от  $I_б$ . Данная зависимость приблизительно описывается формулами:

$$\begin{aligned} I_к &= \beta_{см} I_б, \\ I_э &= (\beta_{см} + 1) I_б, \end{aligned}$$

где  $\beta_{см}$  – статический коэффициент передачи тока базы.

Термин статический подчеркивает тот факт, что этот коэффициент связывает постоянные токи. Типичное значение для современных транзисторов –  $\beta \approx 100 \dots 300$ .

Таким образом, если изменять величину тока  $I_б$  во времени, то токи  $I_к$  и  $I_э$  будут изменяться пропорционально, повторяя форму временной диаграммы  $I_б(t)$ , но при этом, их величины будут в сотни раз больше. В этом и заключается эффект усиления биполярного транзи-

стора – большой выходной ток  $I_k$  ( $I_э$ ) управляется малым входным током  $I_б$ .

**Параметры транзистора.** При определении переменных составляющих токов и напряжений (т. е. при анализе на переменном токе) и при условии, что транзистор работает в активном режиме, его часто представляют в виде линейного четырехполюсника (рисунок 1.16). В четырехполюснике условно изображен транзистор с общим эмиттером.

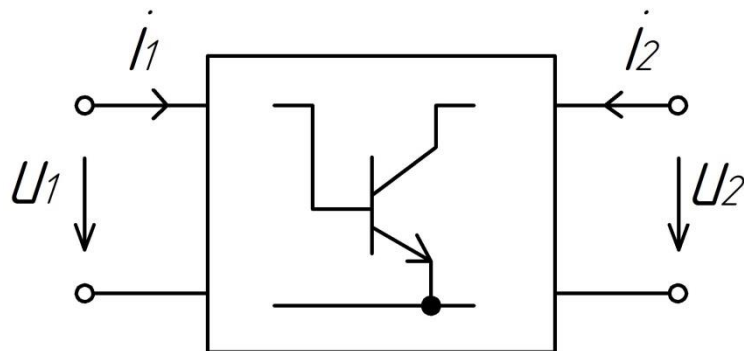


Рисунок 1.16 Транзистор в виде четырехполюсника

Для разных схем включения транзистора токи и напряжения этого четырехполюсника обозначают различные токи и напряжения транзистора. Например, для схемы с общим эмиттером эти токи и напряжения следующие:

$i_1$  – переменная составляющая тока базы;

$u_1$  – переменная составляющая напряжения между базой и эмиттером;

$i_2$  – переменная составляющая тока коллектора;

$u_2$  – переменная составляющая напряжения между коллектором и эмиттером.

Транзистор удобно описывать, используя так называемые  $h$ -параметры.

Входное сопротивление транзистора для переменного сигнала

(при закороченном выходе:  $u_2=0$ ): 
$$h_{11} = \left. \frac{u_1}{i_1} \right|_{u_2=0}.$$

Аналогично

$$h_{12} = \left. \frac{u_1}{u_2} \right|_{i_2=0}$$
 - коэффициент обратной связи по

напряжению.

Режим работы при  $i_I=0$  называют холостым ходом на входе.

Далее 
$$h_{21} = \left. \frac{i_2}{i_1} \right|_{u_2=0}$$
 - коэффициент передачи тока,

$$h_{22} = \left. \frac{i_2}{u_2} \right|_{i_1=0}$$
 - выходная проводимость.

При этом 
$$\begin{bmatrix} u_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ u_2 \end{bmatrix}, \quad \text{т.е.} \quad \begin{aligned} u_1 &= h_{11} \cdot i_1 + h_{12} \cdot u_2; \\ i_2 &= h_{21} \cdot i_1 + h_{22} \cdot u_2. \end{aligned}$$

Коэффициенты  $h_{ij}$  определяются опытным путем. Параметры, соответствующие схеме с общим эмиттером, обозначаются буквой «э», а схеме с общей базой – буквой «б».

## 1.4 Полевые транзисторы

Полевой транзистор является очень широко используемым активным (т. е. способным усиливать сигналы) полупроводниковым прибором.

Полевыми транзисторами называют активные полупроводниковые приборы, в которых выходным током управляют с помощью электрического поля (в биполярных транзисторах выходной ток управляется входным током).

Полевые транзисторы называют также униполярными, так как в процессе протекания электрического тока участвуют только основные носители.

Различают два вида полевых транзисторов: с управляющим переходом и с изолированным затвором.

**Устройство полевого транзистора.** Схематическое изображение структуры полевого транзистора с управляющим переходом и каналом  $p$ -типа приведено на рисунке 1.17, условное графическое обозначение этого транзистора – на рисунке 1.18, *а*. Стрелка указывает направление от слоя  $p$  к слою  $n$  (как и стрелка в изображении эмиттера биполярного транзистора). В интегральных микросхемах линейные размеры транзисторов могут быть меньше 1 мкм.

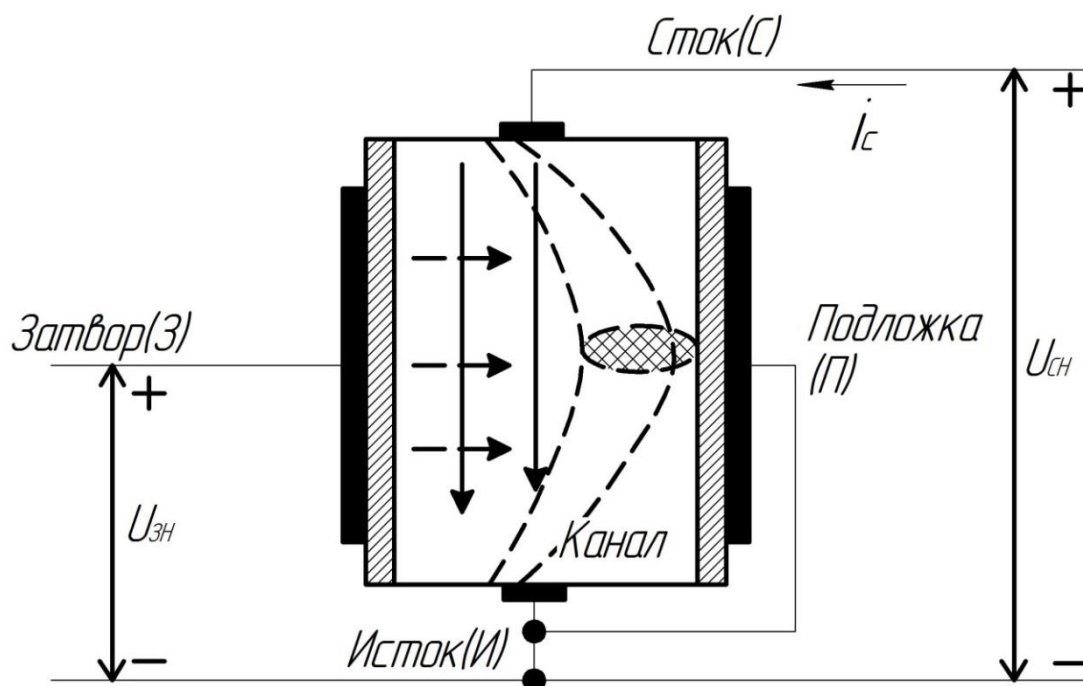


Рисунок 1.17 Структура полевого транзистора

Удельное сопротивление слоя  $n$  (затвора) намного меньше удельного сопротивления слоя  $p$  (канала), поэтому область  $p$ - $n$ -перехода, обедненная подвижными носителями заряда и имеющая очень большое удельное сопротивление, расположена главным образом в слое  $p$ .

Если типы проводимости слоев полупроводника в рассмотренном транзисторе изменить на противоположные, то получим полевой транзистор с управляющим  $p$ - $n$ -переходом и каналом  $n$ -типа. Его условное графическое обозначение представлено на рисунке 1.18, б.

При отсутствии напряжения на затворе ( $U_{зз}=0$ ), ток между стоком и истоком протекает под воздействием «продольного» электрического поля, созданного напряжением  $U_{сн}$ . При этом траектория движения электронов прямолинейна — канал имеет одинаковое сечение по всей длине. При подаче на затвор напряжения отличного от нуля в кристалле возникает «поперечное» электрическое поле, которое, складываясь с «продольным» изгибает силовые линии в ту или иную сторону, соответственно изменяя сечение канала. Изменение сечения канала приводит к изменению его сопротивления — т.е. сопротивлению между истоком и стоком. В случае сужения канала его сопротивление растет, и при достаточной напряженности «поперечного» поля канал полностью «разрывается» (сопротивление становится бесконечным).

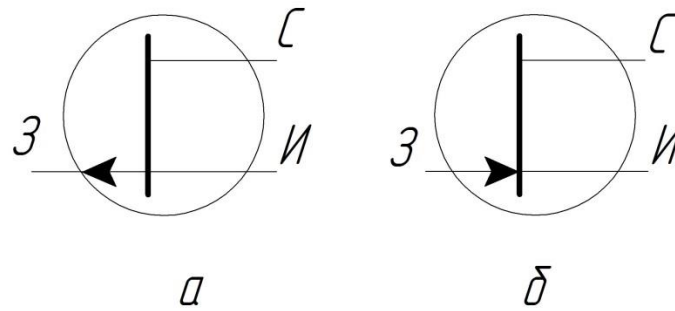


Рисунок 1.18 Графическое изображение полевого транзистора:  
*а* - с каналом *p*-типа; *б* - с каналом *n*-типа

Таким образом, изменяя напряжение  $U_{зи}$  можно управлять сопротивлением исток-сток, а значит и величиной тока  $I_c$ . Основное свойство транзистора – способность к усилению сигнала базируется именно на этой зависимости, которая приблизительно описывается формулой:

$$I_c = S \cdot U_{зи},$$

где  $S$  – крутизна стокзатворной характеристики ПТ.

Она показывает, насколько изменится ток  $I_c$  стока при увеличении  $U_{зи}$  на 1 В. Размерность данного коэффициента [А/В].

Таким образом, если изменять величину  $U_{зи}$  во времени, то ток  $I_c$  будет изменяться пропорционально, повторяя форму временной диаграммы  $U_{зи}(t)$ . При этом, поскольку  $I_z = 0$  (ток не течет через диэлектрик) мощность, затрачиваемая на управление так же будет нулевой. В то же время, ток  $I_c$  совершает в выходной цепи полезную работу. В этом и заключается эффект усиления полевого транзистора – выходной ток  $I_c$  и мощность, рассеиваемая на нагрузке управляется входным напряжением  $U_{зи}$  без затрат мощности на управление.

**Характеристики полевого транзистора.** Выходной характеристикой называют зависимость вида

$$i_c = f(u_{си}) \text{ при } u_{зи} = \text{const},$$

где  $f$  – некоторая функция.

Полевой транзистор характеризуется следующими предельными параметрами:

- максимальным напряжением в цепи сток-исток  $U_{си.макс}$ ;
- максимальным напряжением в цепи затвор-сток  $U_{зс.макс}$ ;
- максимальной мощностью потребления  $P_{макс}$ .

Для транзистора КП103Л эти параметры при  $t=85^{\circ}\text{C}$  принимают следующие значения  $U_{си.макс}=10\text{ В}$ ,  $U_{зс.макс}=15\text{ В}$ ,  $P_{макс}=120\text{ мВт}$ .

Стокзатворной характеристикой называют зависимость вида

$$i_c = f(u_{зи}) \text{ при } u_{си} = \text{const},$$

где  $f$  – некоторая функция.

Типовая переходная ВАХ полевого транзистора, включенного по схеме общим истоком, приведена на рисунке 1.19.

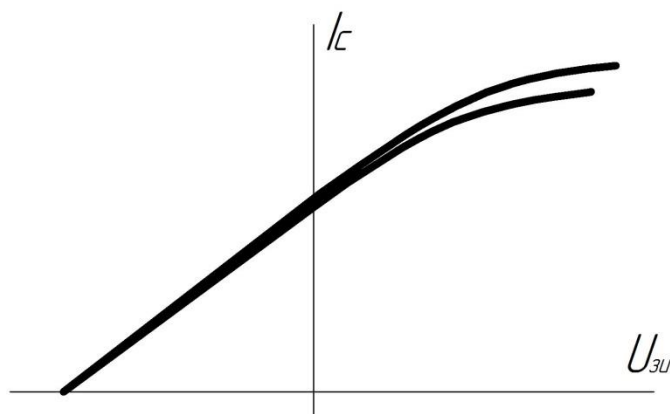


Рисунок 1.19 Типовая переходная ВАХ полевого транзистора, включенного по схеме общим истоком

Такие характеристики не дают принципиально новой информации по сравнению с выходными, но иногда более удобны для использования. Для некоторых транзисторов задается максимальное (по модулю) допустимое отрицательное напряжение  $u_{зи}$ , например, для транзистора 2П103Д это напряжение не должно быть по модулю больше чем  $0,5\text{ В}$ .

**Параметры транзистора.** Крутизна стокзатворной характеристики  $S$  (крутизна характеристики полевого транзистора):

$$S = \left| \frac{di_c}{du_{зи}} \right|,$$

при  $u_{си} = \text{const}$  и заданном значении  $u_{зи}$ .

Обычно задается  $u_{зи}=0$ . При этом для транзисторов рассматривается крутизна максимальная. Для КП103Л  $S=1,8...3,8\text{ мА/В}$  при  $u_{ис}=0$ ,  $t = 20^{\circ}\text{C}$ .

Внутреннее дифференциальное сопротивление  $R_{ис.диф}$  (внутреннее сопротивление) определяется выражением:

$$R_{\text{си.диф}} = \frac{du_{\text{си}}}{di_c},$$

при  $u_{\text{зи}} = \text{const}$  и заданном значении  $u_{\text{си}}$ .

Для КП103Л  $R_{\text{ис.диф}} \approx 25 \text{ кОм}$  при  $u_{\text{ис}}=10 \text{ В}$ ,  $u_{\text{зи}}=0$ .

*Коэффициент усиления*

$$M = \frac{du_{\text{си}}}{du_{\text{зи}}},$$

при  $i_c = \text{const}$  и заданном значении  $u_{\text{зи}}$ .

Можно доказать, что

$$M = S \cdot R_{\text{си.диф}}.$$

Для КП103Л при  $S = 2 \text{ мА/В}$  и  $R_{\text{ис.диф}}=25 \text{ кОм}$   $M = 50$ .

Принципы управления параметрами электронного активного элемента, заложенные в полевых транзисторах, могут быть реализованы в более сложных электронных устройствах. К таким устройствам можно отнести ячейку памяти на основе полевого транзистора с изолированным затвором (флэш-память). Устройства флэш-памяти являются современными быстродействующими программируемыми постоянными запоминающими устройствами (ППЗУ) с электрической записью и электрическим стиранием информации (ЭСП-ПЗУ). Эти устройства являются энергонезависимыми, так как информация не стирается при отключении питания, выдерживают не менее 100 000 циклов записи/стирания. Одной из разновидностей приборов, реализующих принципы полевых транзисторов, являются полупроводниковые приборы с зарядовой связью (ПЗС). Приборы с зарядовой связью используются:

в запоминающих устройствах ЭВМ;

в устройствах преобразования световых (оптических) сигналов в электрические.

## 1.5 Силовые транзисторы

Силовые транзисторы предназначены для замыкания и размыкания силовой электрической цепи. Понятие «силовой» означает, что осуществляется управление потоком электрической энергии, а не потоком информации. К «силовым» приборам формально принято относить приборы с максимально допустимым значением среднего тока свыше 10 А или импульсным током свыше 1000 А.

**МОП-транзисторы.** Среди силовых транзисторов наибольшее распространение получили транзисторы типа металл-оксид-полупроводник (МОП) (англ. MOS — metal oxide semiconductor). Различают два типа МОП-транзисторов: с индуцированным каналом и встроенным каналом. Оба типа имеют выводы из структуры транзисторов: сток *С*, исток *И*, затвор *З*, а также вывод от подложки *П*, соединяемой обычно с истоком. В зависимости от типа электрической проводимости канала различают также транзисторы с *n*- и *p*-типами каналов. На рисунке 1.20 изображена структура (*а*) и условное обозначение (*б*) МОП-транзистора с индуцированным каналом *n*-типа. Для понижения сопротивления областей, соединенных с выводами транзистора, их выполняют с повышенным содержанием носителей. Такие слои обозначают дополнительным верхним индексом, например *n*<sup>+</sup>-типа.

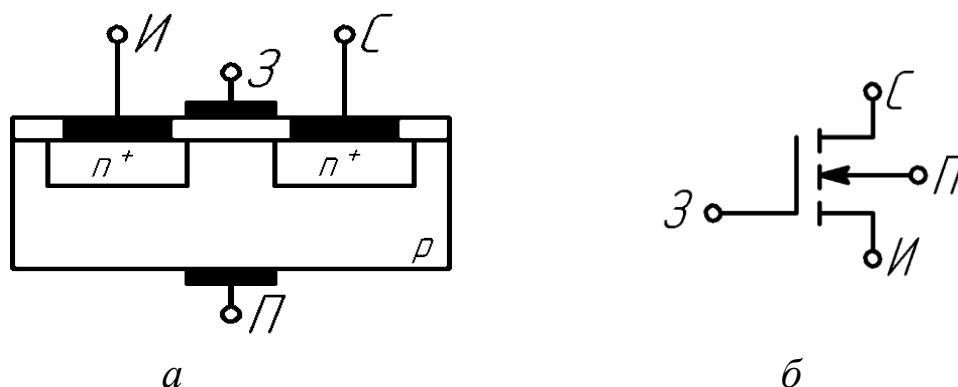


Рисунок 1.20 МОП-транзистор с индуцированным каналом:  
а – структура; б – условное обозначение

Принцип действия этих транзисторов основан на изменении электрической проводимости на границе диэлектрика и полупроводника под воздействием электрического поля. В МОП-транзисторах с индуцированным каналом последний образуется только при подаче напряжения соответствующей полярности на управляющий затвор относительно объединенных выводов истока и подложки, т.е. они работают в режиме обогащения носителями зарядов, что позволяет управлять током стока.

В транзисторах со встроенным каналом, структура которого приведена на рисунке 1.21, *а* ток в цепи сток *С*— исток *И* протекает и при отсутствии напряжения на затворе. Для управления этим током на затвор может подаваться напряжение как больше нуля для обога-

щения канала, так и меньше нуля для его обеднения носителями. На рисунке 1.21, б изображена условное обозначение МОП-транзистора с индуцированным каналом  $n$ -типа.

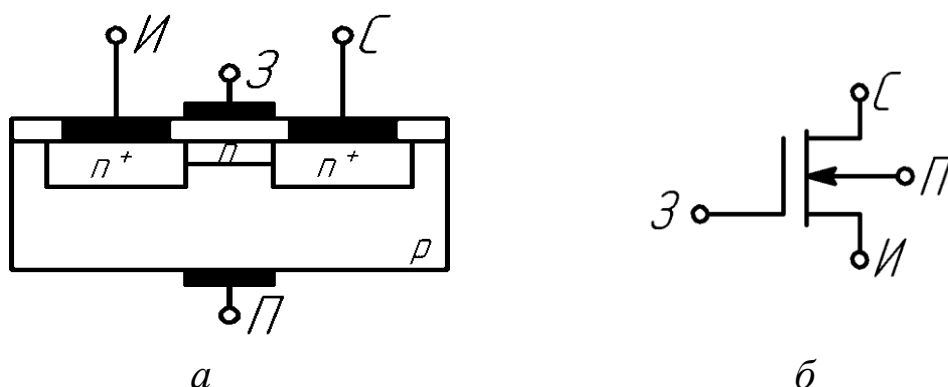


Рисунок 1.21 МОП-транзистор со встроенным каналом:  
а – структура; б – условное обозначение

Допустимые значения коммутируемых токов МОП-транзисторов сильно зависят от напряжения. Например, при токах до 50 А допустимое напряжение обычно не превышает 500 В, сопротивление проводящего канала примерно 0,5 Ом, частота коммутации обычно не превышает 100 кГц.

**Биполярный транзистор с изолированным затвором.** Стремление объединить в одном приборе положительные свойства биполярного и полевого транзисторов привело к созданию гибридной структуры.

Примером такой структуры является биполярный транзистор с изолированным затвором (БТИЗ) (англ. IGBT — insulated gate bipolar transistor). Выполненный в одном кристалле, он имеет низкие потери мощности во включенном состоянии подобно биполярному транзистору и высокое входное сопротивление цепи управления, характерное для полевых транзисторов.

На рисунке 1.22 представлены структура (а) и графическое условное обозначение (б) БТИЗ с каналом  $n$ -типа. Эта структура во многом подобна структуре МОП - транзистора. Принципиальная разница заключается в наличии нижнего слоя с проводимостью  $p^+$ -типа, который придает МОПБТ свойства биполярного транзистора.

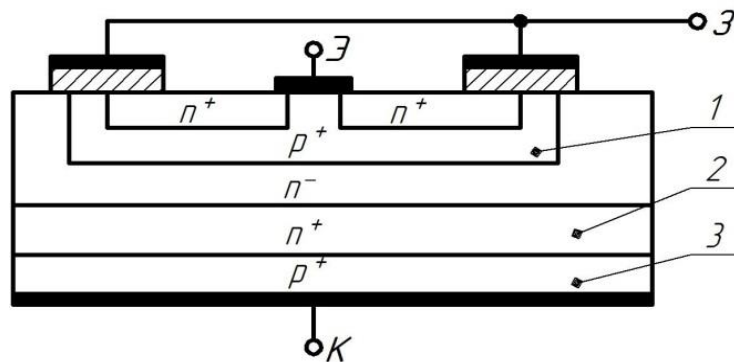


Рисунок 1.22 Биполярный транзистор с изолированным затвором: 1 – область управляющих  $p$ - $n$ - переходов; 2 - буферный слой; 3 - нижний слой

На металлическом основании, к которому присоединён вывод коллектора, расположена подложка  $p^+$ , а на ней находятся два  $n$ -слоя. Эти слои понижают коэффициент усиления  $p$ - $n$ - $p$  структуры мощного биполярного транзистора. Ближайший к подложке  $n^+$ -слой необходим для снижения вероятности самопроизвольного отпираания тиристорной структуры. Подложка  $p^+$  играет роль эмиттера биполярного  $p$ - $n$ - $p$  транзистора, область  $n^-$  - слоя - его базы, а область  $p$ -типа, к которой подключают вывод эмиттера БТИЗ, - его коллектора. Над  $n^-$  - слоем расположена  $p$  - область, которая выполняет функцию канала управляющего МОП-транзистора, затвор которого выполнен из поликристаллического кремния и изолирован от полупроводника эмиттерной области слоем оксида  $\text{SiO}_2$ . В этой канальной  $p$  - области размещены  $n^+$  - зоны, которые выступают в качестве стока МОП - транзистора, а его истоком служит  $n^-$  - область. Затвор структуры МОП - транзистора соединён с выводом затвора БТИЗ.

Если на затвор БТИЗ относительно эмиттера подать напряжение положительной полярности, отпирающее компонент, то это приведёт вначале к открыванию под воздействием электрического поля структуры МОП - транзистора и инжекции электронов в её канал. В результате возникает инжекция носителей заряда в  $n^-$  - слой, служащий базой структуры биполярного  $p$ - $n$ - $p$  транзистора, которая переходит в состояние насыщения. Таким образом, вначале происходит отпирание структуры МОП-транзистора, а лишь затем структуры биполярного  $p$ - $n$ - $p$  транзистора. Сопротивление коллектор-эмиттер открытого БТИЗ имеет очень малую величину, а по выводу коллектора компонента течёт ток нагрузки.

Если убрать поданное ранее отпирающее напряжение на выводы затвор-эмиттер БТИЗ, то канал в структуре МОП- транзистора исчезает, в  $n^-$  - слое происходит снижение концентрации носителей зарядов ввиду рекомбинации. Рекомбинация - процесс не мгновенный; пока она идет, транзистор не закрыт. Лишь по завершении рекомбинации БТИЗ переходит в состояние отсечки.

На рисунке 1.23 приведены условное обозначение биполярных транзисторов с изолированным затвором с каналом  $n$  – типа (а) и с каналом  $p$  - типа (б).



Рисунок 1.23 Условное обозначение биполярных транзисторов с изолированным затвором: а – с каналом  $n$  – типа; б - с каналом  $p$  - типа.

Коммутируемые токи современных силовых БТИЗ (в модульном исполнении) достигают 1,2 кА при напряжении 3,5 кВ, а частота в зависимости от нагрузки находится в диапазоне 10—100 кГц.

## 1.6 Тиристоры

Тиристорами называют полупроводниковые приборы с двумя устойчивыми режимами работы (включен, выключен), имеющие три или более  $p$ - $n$ -переходов.

Тиристор по принципу действия – прибор ключевого типа. Во включенном состоянии он подобен замкнутому ключу, а в выключенном – разомкнутому ключу. Те тиристоры, которые не имеют специальных электродов для подачи сигналов с целью изменения состояния, а имеют только два силовых электрода (анод и катод), называют неуправляемыми, или диодными, тиристорами (динисторами). Приборы с управляющими электродами называют управляемыми тиристорами, или просто тиристорами.

Тиристоры являются основными элементами в силовых устройствах электроники, которые называют также устройствами преобразовательной техники (управляемые выпрямители, инверторы и т. п.).

Существует большое количество различных тиристоров. Наиболее часто используют незапираемые тиристоры с тремя выводами, управляемые по катоду. Такие тиристоры содержат два силовых и один управляющий электрод и проводят ток только в одном направлении.

Упрощенное изображение структуры тиристора представлено на рисунке 1.24, а его условное графическое обозначение – на рисунке 1.25.

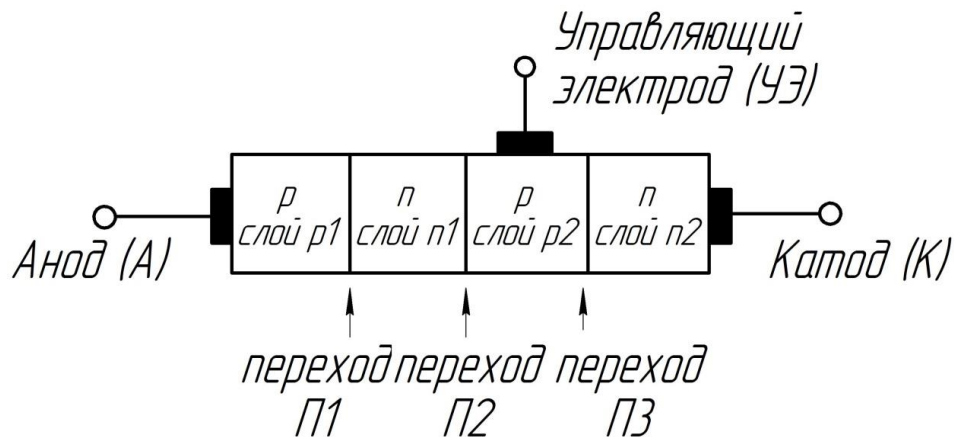


Рисунок 1.24 Структурная схема тиристора

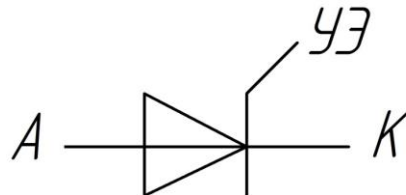


Рисунок 1.25 Графическое изображение тиристора

Обратимся к простейшей схеме с тиристором, изображенной на рисунке 1.26.

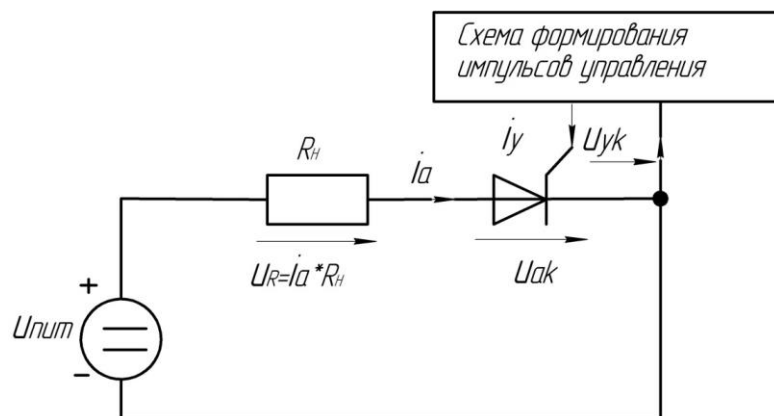


Рисунок 1.26 Схема управления с применением тиристора

На рисунке 1.26 использованы следующие обозначения:

$i_a$  – ток анода (силовой ток в цепи анод-катод тиристора);

$u_{ak}$  – напряжение между анодом и катодом;

$i_y$  – ток управляющего электрода (в реальных схемах используют импульсы тока);

$u_{yk}$  – напряжение между управляющим электродом и катодом;

$u_{num}$  – напряжение питания.

Предположим, что напряжение питания меньше так называемого напряжения переключения  $U_{nep}$  ( $u_{num} < U_{nep}$ ) и что после подключения источника питания импульс управления на тиристор не подавался. Тогда тиристор будет находиться в закрытом (выключенном) состоянии. При этом ток тиристора будет малым ( $i_a = 0$ ) и будут выполняться соотношения  $u_{ak} \approx u_{num}$ ,  $u_R \approx 0$  (нагрузка отключена от источника питания).

Если предположить, что выполняется соотношение  $u_{num} > U_{nep}$  или что после подключения источника питания (даже при выполнении условия  $u_{num} < U_{nep}$ ) был подан импульс управления достаточной величины, то тиристор будет находиться в открытом (включенном) состоянии. При этом для всех трёх переходов будут выполняться соотношения  $u_{ak} \approx 1 \text{ В}$ ,  $i_a \approx u_{num} / R_n$ ,  $u_R \approx u_{num}$  (т. е. нагрузка оказалась подключенной к источнику питания).

Существуют тиристоры, для которых напряжение  $U_{nep}$  больше 1 кВ, а максимально допустимый ток  $i_a$  больше, чем 1 кА.

Характерной особенностью рассматриваемого незапираемого тиристора, который очень широко используется на практике, является то, что его нельзя выключить с помощью тока управления.

Для выключения тиристора на практике на него подают обратное напряжение  $u_{ak} < 0$  и поддерживают это напряжение в течение времени, большего так называемого времени выключения  $t_{выкл}$ . Оно обычно составляет единицы или десятки микросекунд. За это время избыточные заряды в слоях  $n_1$  и  $p_2$  исчезают. Для выключения тиристора напряжение источника питания  $u_{num}$  в приведенной выше схеме (см. рисунок 1.26) должно изменить полярность.

После указанной выдержки времени на тиристор вновь можно подавать прямое напряжение ( $u_{ak} > 0$ ), и он будет выключенным до подачи импульса управления.

Существует большое разнообразие типов тиристоров, весьма различных по своим характеристикам и функциональным возможностям (рисунок 1.27). Среди них следует выделить:

- двухоперационные тиристоры (рисунок 1.27, *а*);
- динистры, включаемые импульсом прямого тока (рисунок 1.27, *б*);
- диод-тиристоры, в которых обычный тиристор интегрально объединен со встречно-включенным силовым диодом, обеспечивающим протекание встречного для тиристора тока (рисунок 1.27, *в*);
- объединенные конструктивно пары встречно-включенных тиристоров (симисторы, или триаки) (рисунок 1.27, *г*);
- оптотиристоры, управляемые световым потоком (рисунок 1.27, *д*).

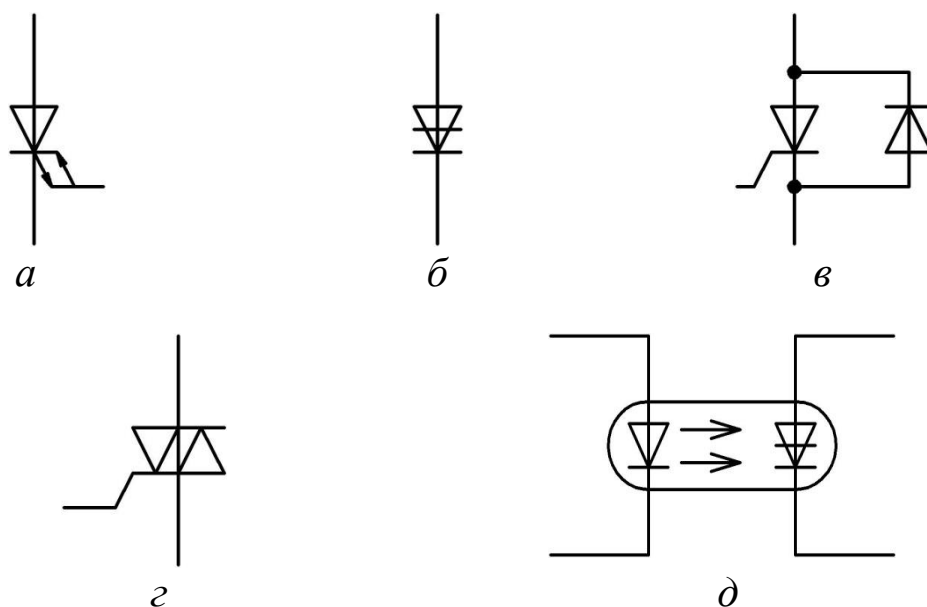


Рисунок 1.27 Типы тиристоры: *а* –двухоперационный; *б* –динистр; *в* – диод-тиристор; *г* – симистр; *д* - оптотиристоры

Все они имеют свои области рационального применения. Неполная управляемость обычных (традиционных) тиристоров существенно снижает эффективность их применения. Для устранения этого недостатка созданы и продолжают разрабатываться тиристоры, запираемые по управляющему электроду. Среди них в настоящее время чаще всего выделяют три типа запираемых тиристоров:

запираемый тиристор (англ. GTO — Gate Turn-Off Thyristor), переключаемый в открытое состояние и наоборот путем подачи на управляющий электрод сигналов соответствующей полярности;

тиристор, переключаемый по управляющему электроду (англ. GCT — Gate Commutated Thyristor), и его разновидность — тиристор, переключаемый по управляющему электроду с интегрированным управлением (англ. IGCT-Integrated Gate Commutated Thyristor), отличающийся наличием интегрированной с тиристором схемы управления;

тиристор с полевым управлением (англ. MCT — MOS-Control Thyristor), содержащий два полевых транзистора, один из которых обеспечивает процесс включения, подавая импульс тока на управляющий электрод, а второй — аналогично процесс выключения тиристора.

Последние разработки GTO и GCT способны блокировать напряжение до 6 кВ и управлять током 6 кА. При этом GCT превосходит GTO по быстродействию и стойкости к скоростям напряжения и тока. Коэффициент усиления по току управления в GCT равен 1, что в 3—5 раз выше, чем в GTO. В то же время длительность тока управления в GCT не превышает 1 мкс.

Тиристоры типа MCT имеют ряд принципиальных преимуществ перед тиристорами типа GTO и GCT в части быстродействия и более простой реализации управления. Современные образцы MCT показывают способность коммутировать мощности свыше 10 МВт при частоте 10 кГц.

## 1.7 Оптоэлектронные приборы

Оптоэлектронными называют приборы, которые чувствительны к электромагнитному излучению в видимой, инфракрасной и ультрафиолетовой областях, а также приборы, производящие или использующие такое излучение.

Излучение в видимой, инфракрасной и ультрафиолетовой областях относят к оптическому диапазону спектра. Обычно к указанному диапазону относят электромагнитные волны с длиной от 1 нм до 1 мм, что соответствует частотам примерно от  $0,5 \cdot 10^{12}$  Гц до  $5 \cdot 10^{17}$  Гц. Иногда говорят о более узком диапазоне частот — от 10 нм до 0,1 мм ( $\sim 5 \cdot 10^{12} \dots 5 \cdot 10^{16}$  Гц). Видимому диапазону соответствуют длины волн от 0,38 мкм до 0,78 мкм (частота около  $10^{15}$  Гц).

На практике широко используются источники излучения (излучатели), приемники излучения (фотоприемники) и оптроны (оптопары).

Оптроном называют прибор, в котором имеется и источник, и приемник излучения, конструктивно объединенные и помещенные в один корпус.

Из источников излучения нашли широкое применение светодиоды и лазеры, а из приемников – фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы и фототиристоры.

Широко используются оптроны, в которых применяются пары светодиод-фотодиод, светодиод-фототранзистор, светодиод-фототиристор.

Основные достоинства оптоэлектронных приборов:

- высокая информационная емкость оптических каналов передачи информации, что является следствием больших значений используемых частот;
- полная гальваническая развязка источника и приемника излучения;
- отсутствие влияния приемника излучения на источник (однонаправленность потока информации);
- невосприимчивость оптических сигналов к электромагнитным полям (высокая помехозащищенность).

### 1.7.1 Излучающий диод

Излучающий диод, работающий в видимом диапазоне волн, часто называют светоизлучающим диодом или светодиодом.

Рассмотрим устройство, характеристики и параметры излучающих диодов.

**Устройство.** Схематическое изображение структуры излучающего диода представлено на рисунке 1.28, а его условное графическое обозначение – на рисунке 1.28, б.

Излучение возникает при протекании прямого тока диода в результате рекомбинации электронов и дырок в области *p-n*-перехода и в областях, примыкающих к указанной области. При рекомбинации излучаются фотоны – бесмассовые частицы, способные существовать в вакууме только двигаясь со скоростью света.

**Характеристики и параметры.** Для излучающих диодов, работающих в видимом диапазоне (длина волн от 0,38 до 0,78 мкм, частота около  $10^{15}$  Гц), широко используются следующие характеристики:

зависимость яркости излучения  $L$  от тока диода  $i$  (яркостная характеристика);

зависимость силы света  $I_v$  от тока диода  $i$ .

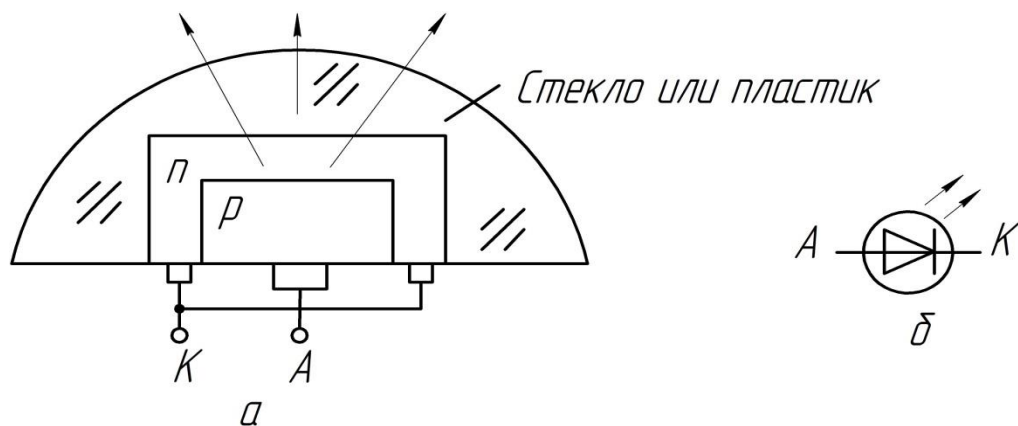


Рисунок 1.28 Светоизлучающий диод:  $a$  – структура;  $b$  – графическое изображение

Яркостная характеристика для светоизлучающего диода типа АЛ102А представлена на рисунке 1.29. Цвет свечения этого диода – красный.

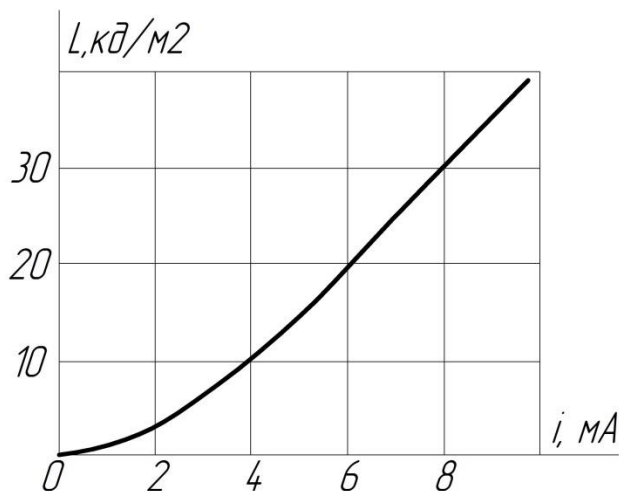


Рисунок 1.29 Яркостная характеристика светодиода

График зависимости силы света от тока для светоизлучающего диода типа АЛ316А представлен на рисунке 1.30. Цвет свечения – красный.

Для излучающих диодов, работающих не в видимом диапазоне, используют характеристики, отражающие зависимость мощности излучения  $P$  от тока диода  $i$ .

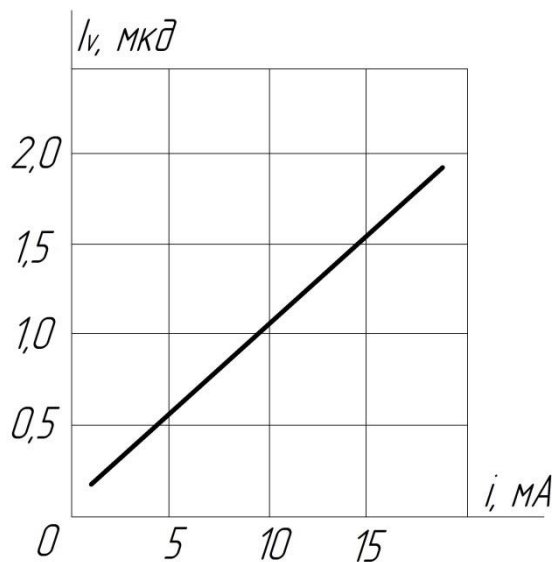


Рисунок 1.30 Зависимость силы света от тока светодиода

Зона возможных положений графика зависимости мощности излучения от тока для излучающего диода типа АЛ119А, работающего в инфракрасном диапазоне (длина волны 0,93...0,96 мкм), представлена на рисунок 1.31.

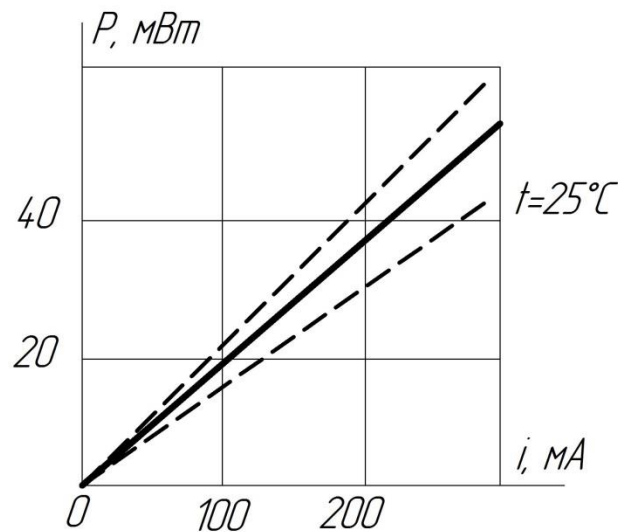


Рисунок 1.31 Зависимость мощности излучения от тока светодиода

Приведем для диода АЛ119А его некоторые параметры:

- время нарастания импульса излучения – не более 1000 нс;
- время спада импульса излучения – не более 1500 нс;
- постоянное прямое напряжение при  $i=300$  мА – не более 3 В;
- постоянный максимально допустимый прямой ток при  $t < +85^\circ\text{C}$  – 200 мА;

- температура окружающей среды  $-60 \dots +85^{\circ}\text{C}$ .

Для информации о возможных значениях коэффициента полезного действия отметим, что излучающие диоды типа ЗЛ115А, АЛ115А, работающие в инфракрасном диапазоне (длина волны  $0,95 \text{ мкм}$ , ширина спектра не более  $0,05 \text{ мкм}$ ), имеют коэффициент полезного действия не менее 10 %.

### 1.7.2 Фоторезистор

Фоторезистором называют полупроводниковый резистор, сопротивление которого чувствительно к электромагнитному излучению в оптическом диапазоне спектра. Схематическое изображение структуры фоторезистора приведено на рисунок 1.32, а, а его условное графическое изображение – на рисунок 1.32,б.

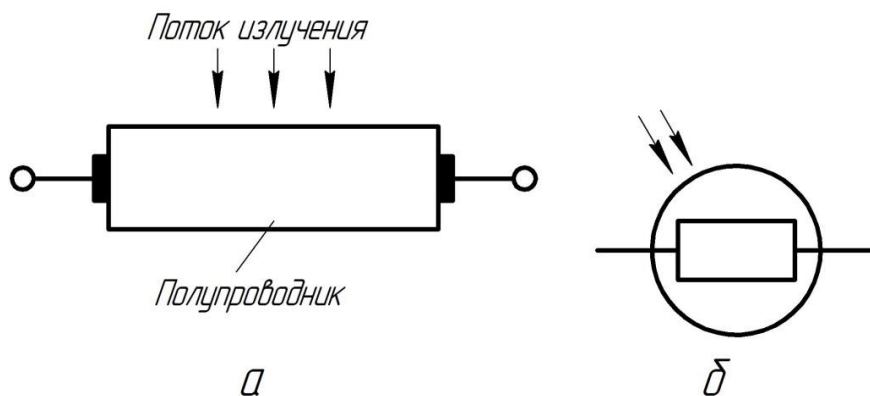


Рисунок 1.32 Фоторезистор: а – структура; б - схематическое обозначение

Поток фотонов, падающих на полупроводник, вызывает появление пар *электрон-дырка*, увеличивающих проводимость (уменьшающих сопротивление). Это явление называют внутренним фотоэффектом (эффектом фотопроводимости). *Люкс-амперной* характеристикой фоторезистора называется зависимость тока  $i$  от освещенности  $E$  при заданном напряжении на резисторе (рисунок 1.33).

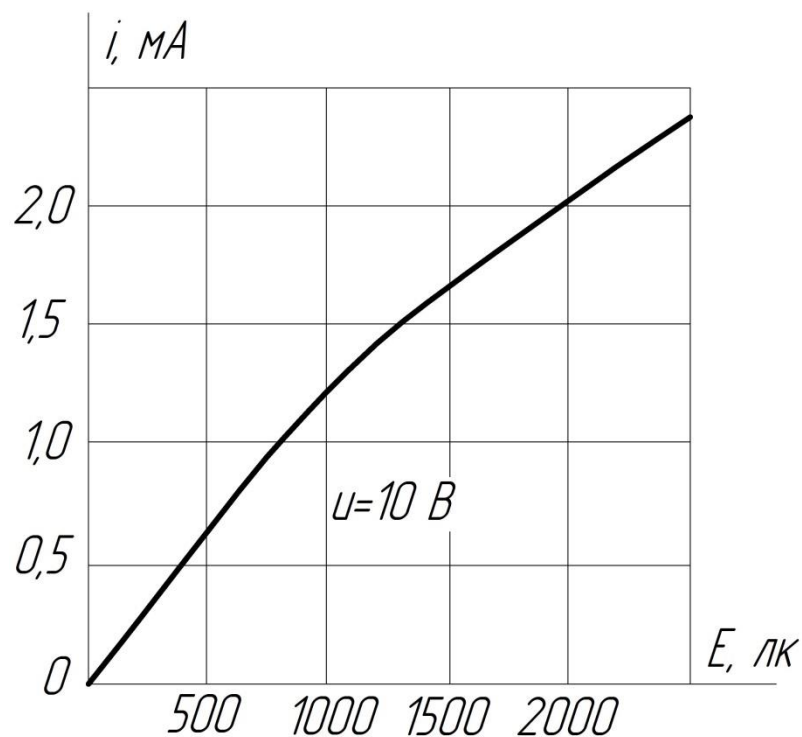


Рисунок 1.33 Люкс-амперная характеристика фоторезистора ФСК-Г7

Часто используют следующие параметры фоторезисторов:

- номинальное темновое (при отсутствии светового потока) сопротивление (для ФСК-Г7 это сопротивление равно  $5\text{ МОм}$ );
- интегральную чувствительность (чувствительность, определяемая при освещении фоторезистора светом сложного спектрального состава).

Интегральная чувствительность (токовая чувствительность к световому потоку)  $S$  определяется выражением:

$$S = \frac{i_{\phi}}{\Phi},$$

где  $i_{\phi}$  – так называемый фототок (разность между током при освещении и током при отсутствии освещения);

$\Phi$  – световой поток.

Для фоторезистора ФСК-Г7  $S=0,7\text{ А/лм}$ .

### 1.7.3 Фотодиод

Фотодиодом называется прибор, который преобразует попавший на его фоточувствительную область свет в электрический заряд за счёт процессов в  $p$ - $n$  – переходе.

**Устройство и основные физические процессы.** Упрощенная структура фотодиода приведена на рисунок 1.34, а, а его условное графическое изображение – на рисунок 1.34, б.

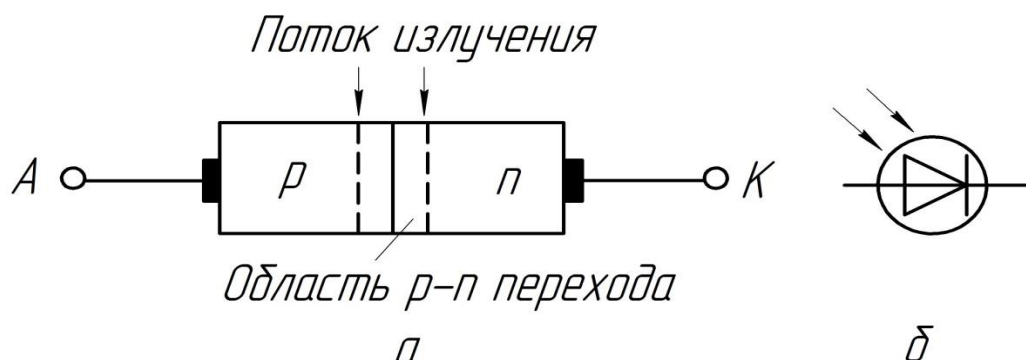


Рисунок 1.34 Фотодиод: а – структура; б - обозначение

Физические процессы, протекающие в фотодиодах, носят обратный характер по отношению к процессам, протекающим в светодиодах. Основным физическим явлением в фотодиоде является генерация пар *электрон-дырка* в области *р-п-перехода* и в прилегающих к нему областях под действием излучения.

Генерация пар *электрон-дырка* приводит к увеличению обратного тока диода при наличии обратного напряжения и к появлению напряжения  $u_{ак}$  между анодом и катодом при разомкнутой цепи. Причем  $u_{ак} > 0$  (дырки переходят к аноду, а электроны – к катоду под действием электрического поля *р-п-перехода*).

**Характеристики и параметры.** Фотодиоды удобно характеризовать семейством ВАХ, соответствующих различным световым потокам (световой поток измеряется в люменах, *лм*) или различным освещенностям (освещенность измеряется в люксах, *лк*).

ВАХ фотодиода представлена на рисунке 1.35.

Если вначале световой поток равен нулю, то ВАХ фотодиода фактически повторяет ВАХ обычного диода. Если световой поток не равен нулю, то фотоны, проникая в область *р-п-перехода*, вызывают генерацию пар *электрон-дырка*. Под действием электрического поля *р-п-перехода* носители тока движутся к электродам (дырки – к электроду слоя *р*, электроны – к электроду слоя *п*). В результате между электродами возникает напряжение, которое возрастает при увеличении светового потока. При положительном напряжении анод-катод ток диода может быть отрицательным (четвертый квадрант характеристики). При этом прибор не потребляет, а вырабатывает энергию.

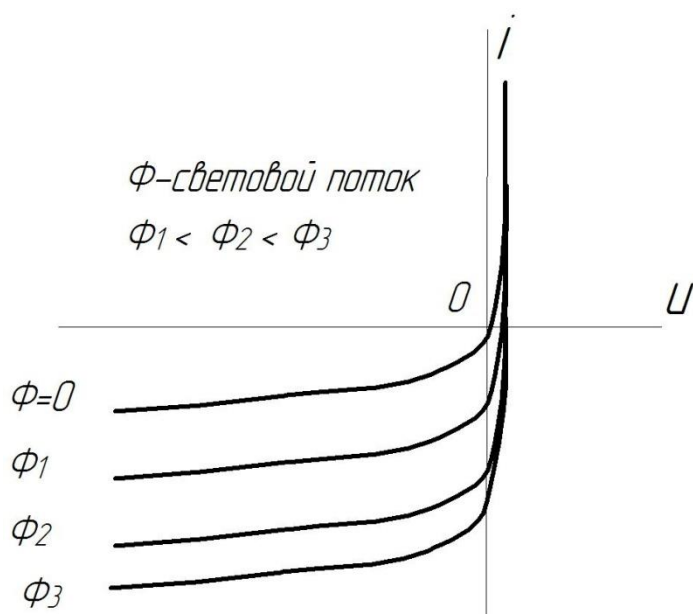


Рисунок 1.35 ВАХ фотодиода

На практике фотодиоды используют и в так называемом режиме фотогенератора (фотогальванический режим, вентильный режим), и в так называемом режиме фотопреобразователя (фотодиодный режим).

В режиме фотогенератора работают солнечные элементы, преобразующие свет в электроэнергию. В настоящее время коэффициент полезного действия солнечных элементов достигает 20 %. Пока энергия, полученная от солнечных элементов, примерно в 50 раз дороже энергии, получаемой из угля, нефти или урана.

Режим фотопреобразователя соответствует ВАХ в третьем квадранте. В этом режиме фотодиод потребляет энергию ( $u \cdot i > 0$ ) от некоторого обязательно имеющегося в цепи внешнего источника напряжения.

Фотодиоды являются более быстродействующими приборами по сравнению с фоторезисторами. Они работают на частотах  $10^7$ – $10^{10}$  Гц. Фотодиод часто используют в оптопарах *светодиод-фотодиод*. В этом случае различные характеристики фотодиода соответствуют различным токам светодиода (который при этом создает различные световые потоки).

#### 1.7.4 Оптрон, фототранзистор и фототиристор

Оптрон (оптопара) – полупроводниковый прибор, содержащий источник излучения и приемник излучения, объединенных в одном корпусе и связанные между собой оптически, электрически и одно-

временно обеими связями. Очень широко распространены оптроны, у которых в качестве приемника излучения используются фоторезистор, фотодиод, фототранзистор и фототиристор.

В резисторных оптронах выходное сопротивление при изменении режима входной цепи может изменяться в  $10^7 \dots 10^8$  раз. Кроме того, вольт-амперная характеристика фоторезистора отличается высокой линейностью и симметричностью, что обуславливает широкую применимость резистивных оптопар в аналоговых устройствах. Недостатком резисторных оптронов является низкое быстродействие –  $0,01 \dots 1$  с.

В цепях передачи цифровых информационных сигналов применяются главным образом диодные и транзисторные оптроны, а для оптической коммутации высоковольтных сильноточных цепей – тиристорные оптроны. Быстродействие тиристорных и транзисторных оптронов характеризуется временем переключения, которое часто лежит в диапазоне  $5 \dots 50$  мкс.

Рассмотрим подробнее оптопару светодиод-фотодиод (рисунок 1.36, а). Излучающий диод (слева) должен быть включен в прямом направлении, а фотодиод – в прямом (режим фотогенератора) или обратном направлении (режим фотопреобразователя). Направления токов и напряжений диодов оптопары приведены на рисунке 1.32, б.

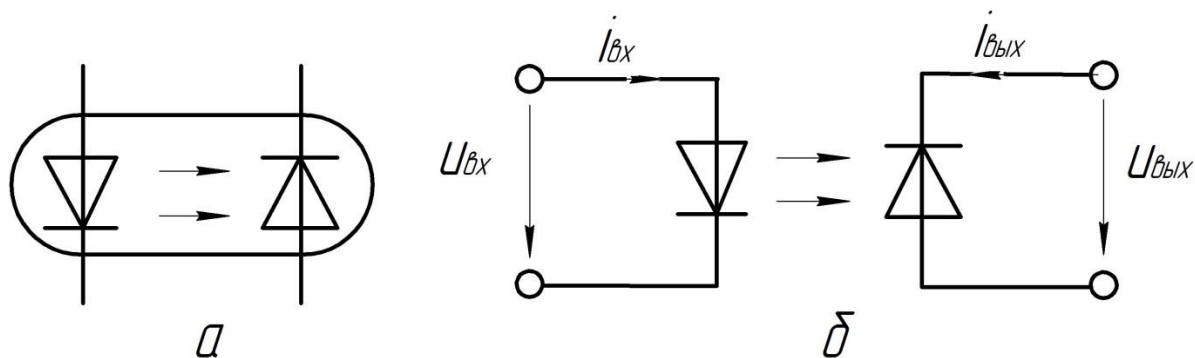


Рисунок 1.36 Оптопара: а – схема; б - направление токов и напряжений в ней

Изобразим зависимость тока  $i_{\text{вых}}$  от тока  $i_{\text{вх}}$  при  $u_{\text{вых}}=0$  для оптопары АОД107А (рисунок 1.37).

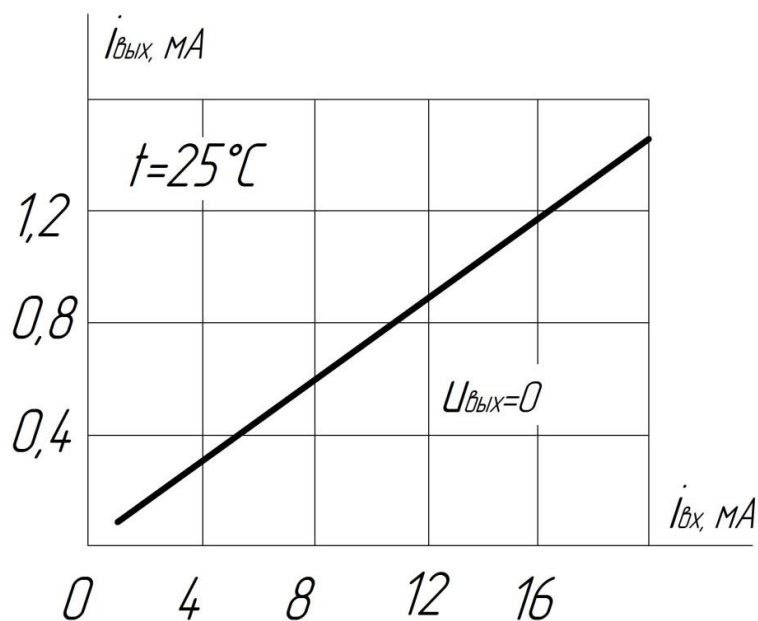


Рисунок 1.37 Передаточная характеристика оптопары АОД107А

Указанная оптопара предназначена для работы как в фотогенераторном, так и в фотопреобразовательном режиме.

Выходные характеристики фототранзистора подобны выходным характеристикам обычного биполярного транзистора, в котором положение характеристик определяется не током базы, а уровнем освещенности (или величиной светового потока).

Свойства фототиристора подобны свойствам обычного тиристора, однако с той лишь особенностью, что включение тиристора осуществляется не с помощью импульса тока управления, а с помощью светового импульса.

## 1.8 Интегральные микросхемы

Интегральные микросхемы, или интегральные схемы (ИС) – микроэлектронное изделие (т.е. изделие с высокой степенью миниатюризации), выполняющее определенную функцию преобразования и обработки сигнала и имеющее высокую плотность упаковки электрически соединенных элементов (или элементов и компонентов) и (или) кристаллов, которое с точки зрения требований к испытаниям, приемке, поставке и эксплуатации рассматривается как единое целое.

*Элемент интегральной схемы* – часть интегральной схемы, реализующая функцию какого-либо электрорадиоэлемента (резистора, диода, транзистора и т.д.), причем эта часть выполнена нераздельно

от других частей и не может быть выделена как самостоятельное изделие с точки зрения требований к испытаниям, приемке, поставке и эксплуатации.

*Компонент интегральной схемы* в отличие от элемента может быть выделен как самостоятельное изделие с указанной выше точки зрения.

По конструктивно-технологическим признакам интегральные схемы обычно подразделяются на:

- полупроводниковые;
- гибридные;
- пленочные.

В полупроводниковой схеме все элементы и межэлементные соединения выполнены в объеме или на поверхности полупроводника. В таких схемах нет компонентов. Это наиболее распространенная разновидность интегральных схем.

Интегральную схему называют гибридной, если она содержит компоненты и (или) отдельные кристаллы полупроводника.

В пленочных интегральных схемах отдельные элементы и межэлементные соединения выполняются на поверхности диэлектрика (обычно используется керамика). При этом применяются различные технологии нанесения пленок из соответствующих материалов.

По функциональным признакам интегральные схемы подразделяются на аналоговые (операционные усилители, источники вторичного электропитания и др.) и цифровые (логические элементы, триггеры и т.п.).

### Вопросы для самоконтроля

- 1) Что изучает электроника?
- 2) Какие материалы называются полупроводниками?
- 3) Какая проводимость называется собственной?
- 4) Какие полупроводниковые приборы называются диодами?
- 5) Перечислите виды диодов?
- 6) Что называется вольт-амперной характеристикой диода?
- 7) Где применяются стабилитроны?
- 8) Какой транзистор называется биполярным, а какой - полевым?
- 9) Назовите основные способы включения биполярного транзистора?

- 10) Какие параметры называются  $h$  – параметрами биполярного транзистора?
- 11) Какой электрод называется базой, какой – коллектором, а какой – эмиттером?
- 12) Какой транзистор называется  $n-p-n$  – типа, а какой –  $p-n-p$  – типа?
- 13) Написать зависимость тока эмиттера (коллектора) от тока базы транзистора.
- 14) Какой электрод полевого транзистора называется затвором, какой – стоком, а какой – истоком?
- 15) Что называется переходной характеристикой полевого транзистора?
- 16) Какой полупроводниковый прибор называется тиристором?
- 17) Назовите характеристики фоторезистора?
- 18) В каких режимах работают фотодиоды?
- 19) Что называется оптроном?
- 20) Что называется интегральной микросхемой?

## 2 АНАЛОГОВЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА

### 2.1 Усилители

#### 2.1.1 Классификация, основные характеристики и параметры

Усилитель – это электронное устройство, управляющее потоком энергии, идущей от источника питания к нагрузке. Причем, мощность, требующаяся для управления, намного меньше мощности, отдаваемой в нагрузку, а форма входного (усиливаемого) и выходного (на нагрузку) сигналов совпадают (рисунок 2.1).

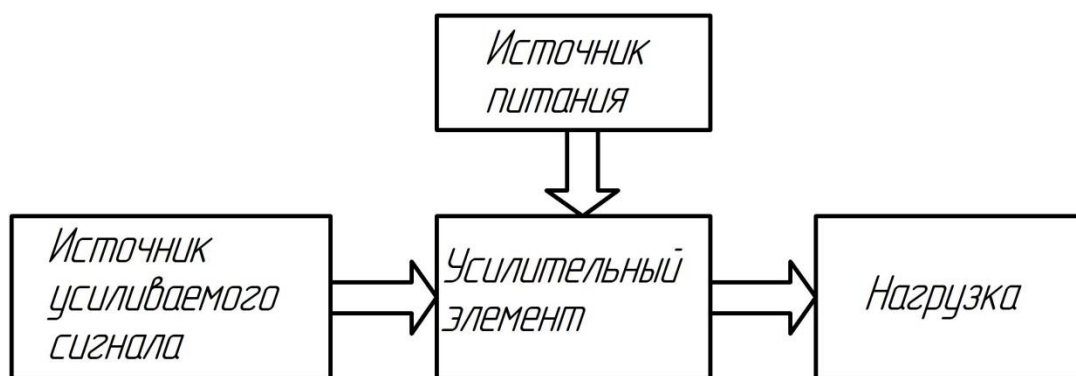


Рисунок 2.1 Функциональная схема усилителя

**Классификация.** Все усилители можно классифицировать по следующим признакам:

- по частоте усиливаемого сигнала: усилители низкой частоты (УНЧ) для усиления сигналов с частотой от  $10\text{ Гц}$  до  $100\text{ кГц}$ ; широкополосные усилители, усиливающие сигналы от  $1$  до  $100\text{ МГц}$ ; избирательные усилители, усиливающие сигналы узкой полосы частот;
- по роду усиливаемого сигнала: усилители постоянного тока (УПТ), усиливающие электрические сигналы с частотой от  $0\text{ Гц}$  и выше; усилители переменного тока, усиливающие электрические сигналы с частотой, отличной от нуля;
- по функциональному назначению: усилители напряжения, усилители тока и усилители мощности (в зависимости от того, какой из параметров усиливается усилителем).

Основным качественным параметром усилителя является *коэффициент усиления*. В зависимости от функционального назначения

усилителя различают коэффициенты усиления по напряжению  $K_U$ , току  $K_I$  или мощности  $K_P$ :

$$K_U = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}, \quad K_I = \frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}}, \quad K_P = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}},$$

где  $U_{\text{вх}}, I_{\text{вх}}$  – амплитудные значения переменных составляющих соответственно напряжения и тока на входе;

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

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

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  $K_u = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}$  – модуль коэффициента усиления;

$\varphi$  – сдвиг фаз между входным и выходным напряжениями с амплитудами  $U_{\text{вх}}$  и  $U_{\text{вых}}$ .

Помимо коэффициента усиления важным количественным показателем является коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{ист}}},$$

где  $P_{\text{ист}}$  – мощность, потребляемая от источника питания.

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

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

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

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

$\Delta U_{\text{вых}}$  и  $\Delta I_{\text{вых}}$  – приращения амплитудных значений напряжения и тока на выходе усилителя, вызванные изменением сопротивления нагрузки.

Рассмотрим основные характеристики усилителей.

*Амплитудная характеристика* – это зависимость амплитуды выходного напряжения (тока) от амплитуды входного напряжения

(тока) (рисунок 2.2). Точка 1 соответствует напряжению шумов, измеряемому при  $U_{\text{вх}}=0$ , точка 2 – минимальному входному напряжению, при котором на выходе усилителя можно различить сигнал на фоне шумов. Участок 2–3 – это рабочий участок, на котором сохраняется пропорциональность между входным и выходным напряжением усилителя. После точки 3 наблюдаются нелинейные искажения входного сигнала. Степень нелинейных искажений оценивается коэффициентом нелинейных искажений (или коэффициентом гармоник):

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

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

Величина  $D = \frac{U_{\text{вх. max}}}{U_{\text{вх. min}}}$  характеризует динамический диапазон усилителя.

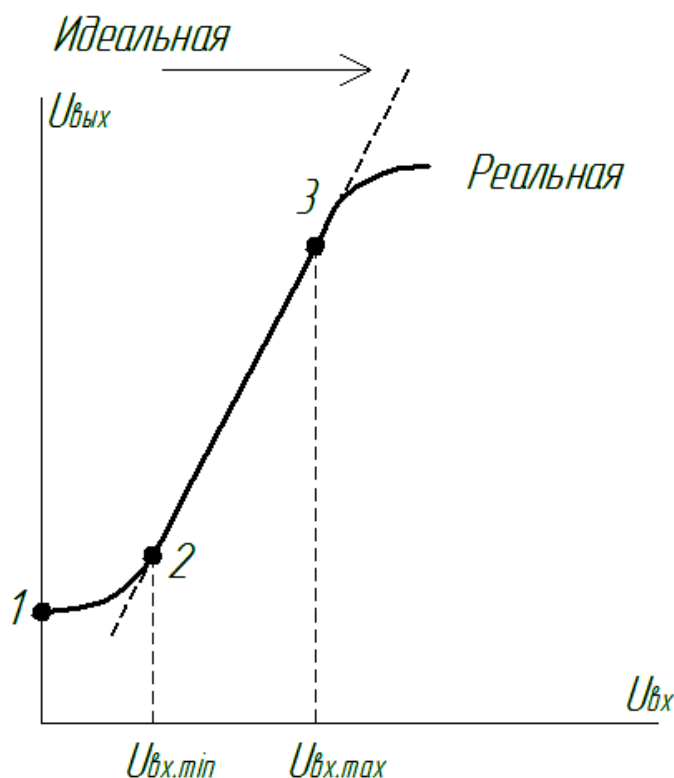


Рисунок 2.2 Амплитудная характеристика усилителя

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) усилителя – это зависимость модуля коэффициента усиления от частоты (рисунок 2.3). Частоты  $f_n$  и  $f_v$  называются нижней и верхней граничными частотами, а их разность  $(f_n - f_v)$  – полосой пропускания 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.

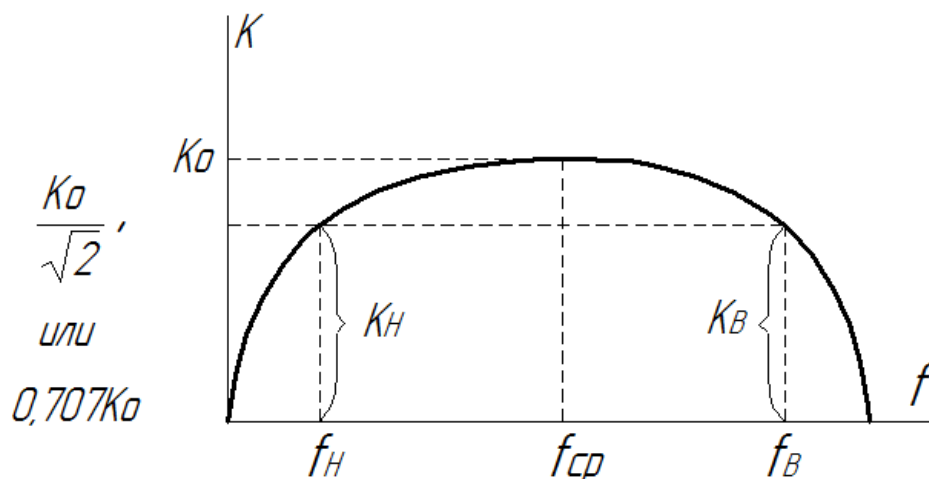


Рисунок 2.3 Амплитудно-частотная характеристика усилителя

Такие искажения называются частотными и характеризуются коэффициентом частотных искажений:  $M = \frac{K_0}{K_f}$ , где  $K_f$  — модуль коэффициента усиления на заданной частоте. Коэффициенты частотных искажений  $M_n = \frac{K_0}{K_n}$  и  $M_v = \frac{K_0}{K_v}$  называются соответственно коэффициентами искажений на нижней и верхней граничных частотах.

АЧХ может быть построена и в логарифмическом масштабе. В этом случае она называется ЛАЧХ (рисунок 2.4), коэффициент усиления усилителя выражается в децибелах, а по оси абсцисс откладываются 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.

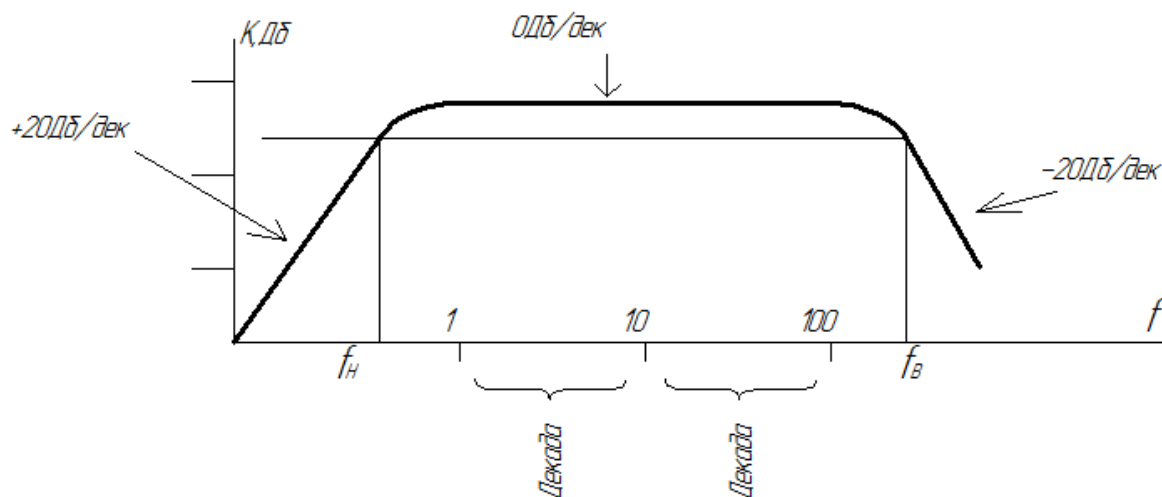


Рисунок 2.4 Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика усилителя

Фазо-частотная характеристика (ФЧХ) усилителя – это зависимость угла сдвига фаз между входным и выходным напряжениями от частоты. Типовая ФЧХ приведена на рисунке 2.5. 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.

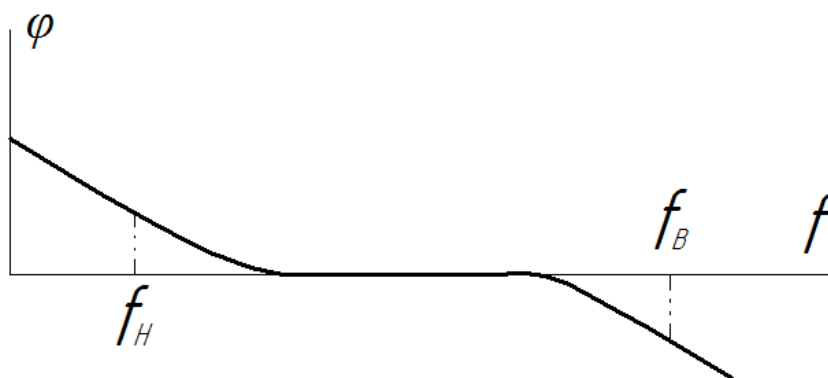


Рисунок 2.5 Фазо-частотная характеристика усилителя

Пример возникновения фазовых искажений приведен на рисунке 2.6, где показано усиление входного сигнала, состоящего из двух гармоник (пунктир), которые при усилении претерпевают фазовые сдвиги.

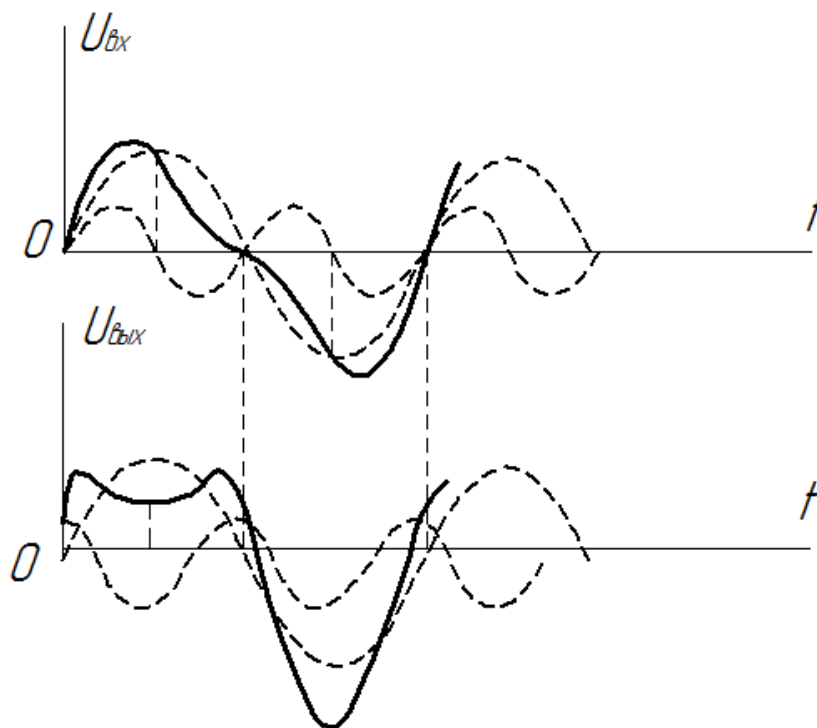


Рисунок 2.6. Фазовые искажения в усилителе

*Переходная характеристика усилителя* – это зависимость выходного сигнала (тока, напряжения) от времени при скачкообразном входном воздействии (рисунок 2.7). На рисунке 2.7 приняты следующие обозначения:

$U_m$  – высота импульса;

$\delta$  – выброс фронта импульса;

$\Delta$  – спад вершины импульса.

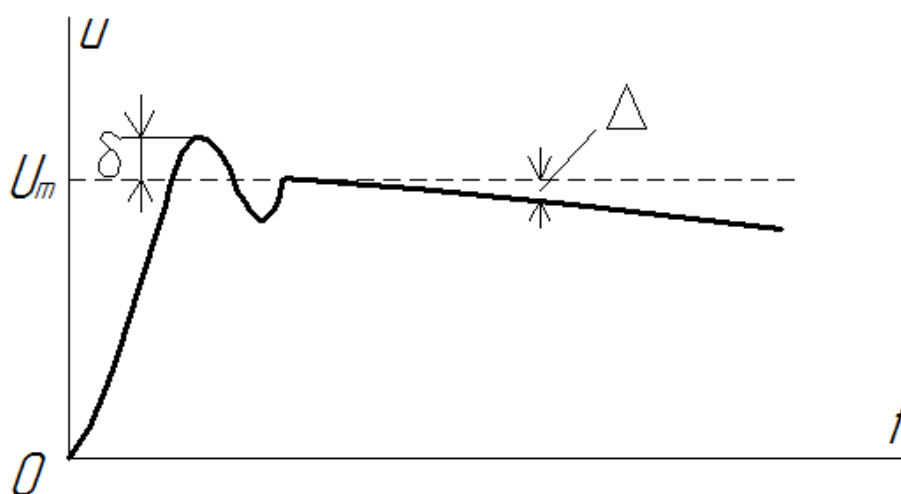


Рисунок 2.7 Переходная характеристика усилителя

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

### 2.1.2 Обратная связь в усилителях

Понятие «обратная связь» (ОС) широко используется как в технике, так и в других областях знаний. Обратной связью называют цепь, по которой часть энергии с выхода усилителя поступает на его вход. В усилителях, как правило, используется так называемая *отрицательная обратная связь* (ООС). При наличии отрицательной обратной связи выходной сигнал, таким образом, влияет на входной, что входной сигнал уменьшается и соответственно приводит к уменьшению выходного сигнала. При этом уменьшаются искажения сигнала, расширяется частотный диапазон и т. д.

Классификация обратных связей в усилителях представлена на рисунке 2.8.

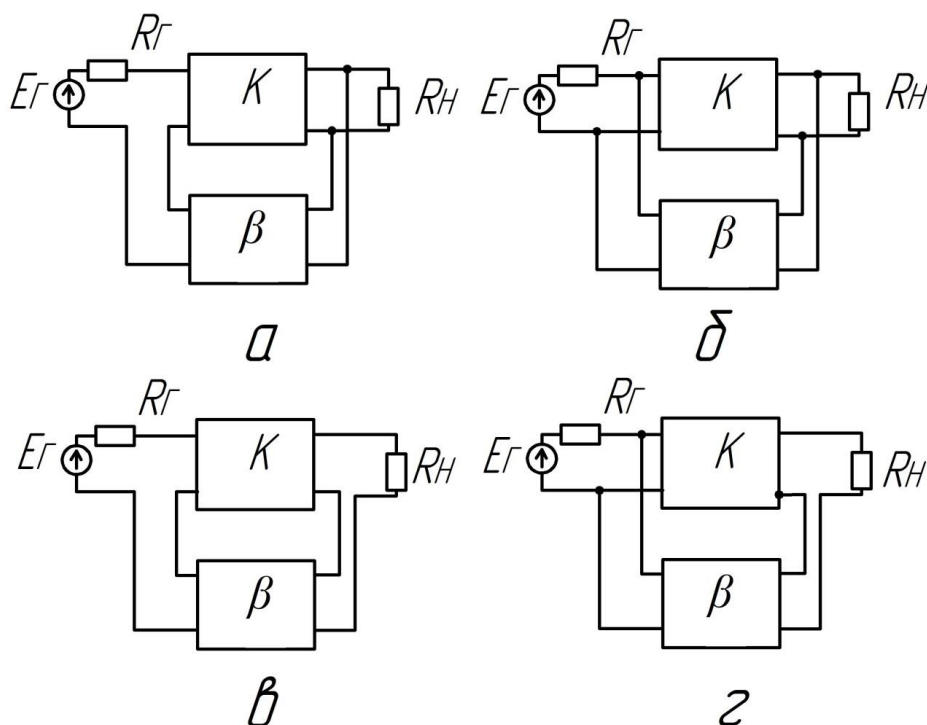


Рисунок 2.8 Классификация обратных связей усилителя:  
*a* - последовательная по напряжению; *б* - параллельная по напряжению; *в* - последовательная по току; *г* - параллельная по току

На рисунке 2.8 приняты следующие обозначения:

$K$  – коэффициент прямой передачи, или коэффициент усиления усилителя без обратной связи;

$\beta$  – коэффициент передачи цепи обратной связи.

Для определения вида ОС нужно «закоротить» нагрузку. Если при этом сигнал обратной связи обращается в нуль, то это является ОС по напряжению, если сигнал ОС не обращается в нуль, то это – ОС по току. При обратной связи по напряжению сигнал обратной связи, поступающий с выхода усилителя на вход, пропорционален выходному напряжению. При обратной связи по току сигнал обратной связи пропорционален выходному току. При последовательной обратной связи (со сложением напряжений) в качестве сигнала обратной связи используется напряжение, которое вычитается (для отрицательной обратной связи) из напряжения внешнего входного сигнала. При параллельной обратной связи (со сложением токов) в качестве сигнала обратной связи используется ток, который вычитается из тока внешнего входного сигнала.

### 2.1.3 Усилители на биполярных транзисторах

В усилителе в качестве активного элемента использован биполярный транзистор. Перед тем, как подавать на вход усилителя сигнал, подлежащий усилению, необходимо обеспечить начальный режим работы.

Статическим режимом работы усилителя (режим по постоянному току, режим покоя) называется режим, который характеризуется постоянными токами электродов транзистора и напряжениями между этими электродами.

Для характеристики проблемы обеспечения начального режима рассматривают следующие три схемы:

- с фиксированным током базы;
- с коллекторной стабилизацией;
- с эмиттерной стабилизацией.

Схема с фиксированным током базы приведена на рисунке 2.9.

В соответствии со вторым законом Кирхгофа

$$i_K \cdot R_K + u_{кэ} - E_K = 0.$$

Отсюда находим ток коллектора  $i_K$ :

$$i_K = -\frac{1}{R_K} \cdot u_{кэ} + \frac{1}{R_K} \cdot E_K,$$

что соответствует линейной зависимости вида  $y = a \cdot x + b$ .

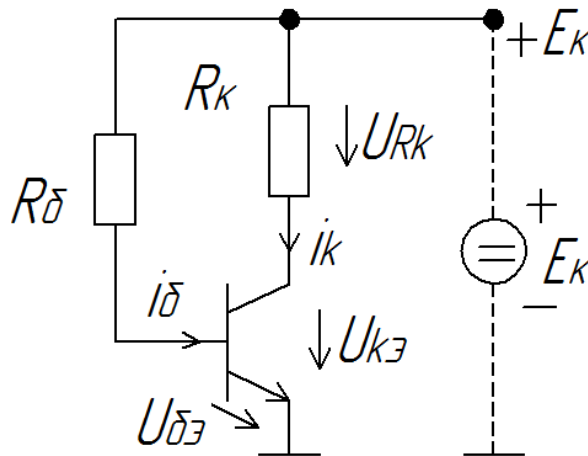


Рисунок 2.9 Схема включения транзистора с фиксированным током базы

Это уравнение описывает так называемую линию нагрузки. Изобразим выходные характеристики транзистора и линию нагрузки (рисунок 2.10).

В соответствии со вторым законом Кирхгофа

$$i_{\delta} \cdot R_{\delta} + u_{\delta\epsilon} - E_k = 0.$$

Отсюда находим ток базы  $i_{\delta}$ :

$$i_{\delta} = -\frac{1}{R_{\delta}} \cdot u_{\delta\epsilon} + \frac{1}{R_{\delta}} \cdot E_k.$$

Учитывая, что  $u_{\delta\epsilon} \ll E_k$ , пренебрежем напряжением  $u_{\delta\epsilon}$ . Тогда

$$i_{\delta} \approx \frac{1}{R_{\delta}} \cdot E_k.$$

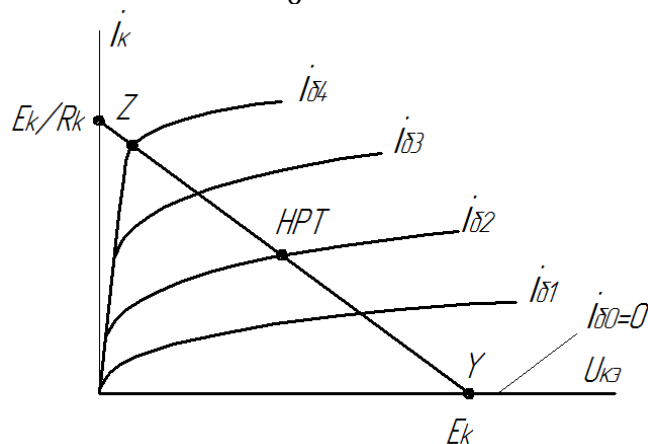


Рисунок 2.10 Выходные характеристики транзистора с линией нагрузки

Таким образом, в рассматриваемой схеме ток  $i_{\bar{o}}$  задается величинами  $E_K$  и  $R_{\bar{o}}$  (ток «фиксирован»). При этом

$$i_K = \beta_{cm} \cdot i_{\bar{o}} + I'_{K0}.$$

Пусть  $i_{\bar{o}} = i_{\bar{o}2}$ . Тогда начальная рабочая точка (НРТ) займет то положение, которое указано на рисунке 2.10. Видно, что самое нижнее возможное положение начальной рабочей точки соответствует точке Y (режим отсечки,  $i_{\bar{o}} = 0$ ), а самое верхнее положение – точке Z (режим насыщения,  $i_{\bar{o}} \geq i_{\bar{o}4}$ ).

Схему с фиксированным током базы используют редко по следующим причинам:

- при воздействии дестабилизирующих факторов (например, температуры) изменяются величины  $\beta_{cm}$  и  $I'_{K0}$ , что изменяет ток  $I_{KH}$  и положение начальной рабочей точки;

- для каждого значения  $\beta_{cm}$  необходимо подбирать соответствующее значение  $R_{\bar{o}}$ , что нежелательно при использовании как дискретных приборов (т. е. приборов, изготовленных не по интегральной технологии), так и интегральных схем.

Схема с коллекторной стабилизацией, приведенная на рисунке 2.11, обеспечивает лучшую стабильность начального режима.

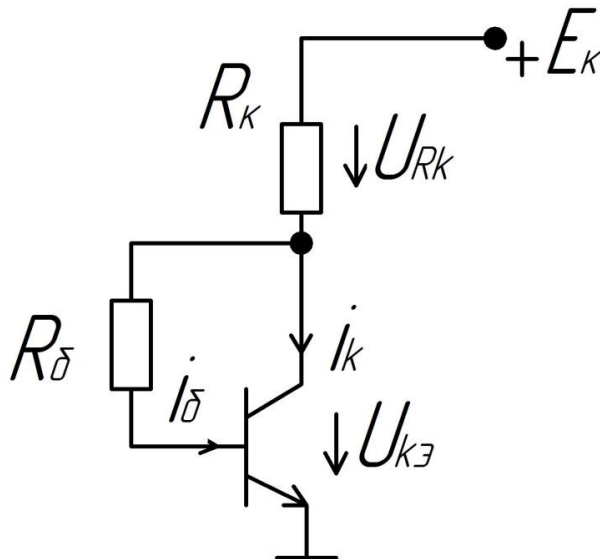


Рисунок 2.11 Схема включения транзистора с коллекторной стабилизацией

В схеме имеет место отрицательная обратная связь по напряжению (выход схемы – коллектор транзистора соединен со входом схемы – базой транзистора с помощью резистора  $R_{\bar{o}}$ ). При увеличении тока  $i_K$  (например, из-за повышения температуры) начинает увеличи-

ваться напряжение  $u_{R_K}$ . Это приведет к уменьшению напряжения  $u_{KЭ}$  и тока  $i_{\delta}$  ( $i_{\delta} \approx \frac{u_{KЭ}}{R_{\delta}}$ ), что будет препятствовать значительному увеличению тока  $i_K$ , т. е. будет осуществляться стабилизация тока коллектора.

Основная идея, реализованная в схеме с эмиттерной стабилизацией (рисунок 2.12), состоит в том, чтобы зафиксировать ток  $i_{\delta}$  и через это – ток  $i_K$  ( $i_K \approx i_{\delta}$ ). С указанной целью в цепь эмиттера включают резистор  $R_{\delta}$  и создают на нем практически постоянное напряжение  $u_{R_{\delta}}$ . При этом оказывается, что:

$$i_{\delta} = \frac{u_{R_{\delta}}}{R_{\delta}} = \text{const}.$$

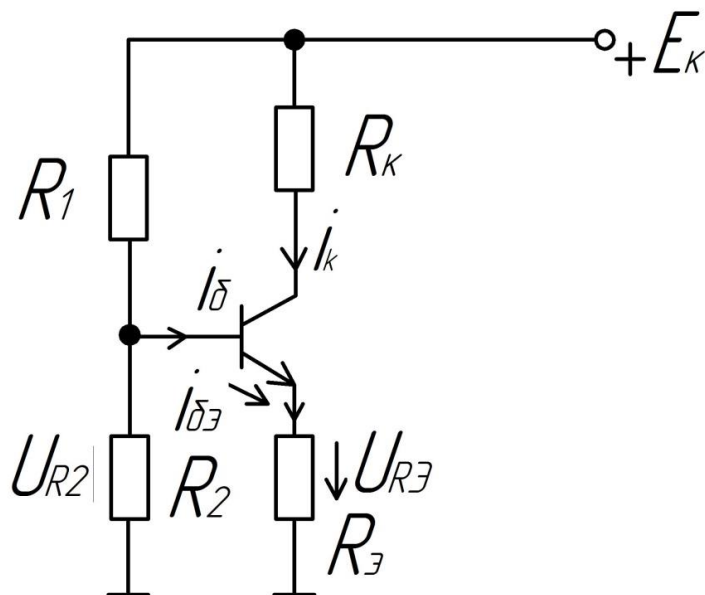


Рисунок 2.12 Схема включения транзистора с эмиттерной стабилизацией

Для создания требуемого напряжения  $u_{R_{\delta}}$  используют делитель напряжения на резисторах  $R_1$  и  $R_2$ .

Резисторы  $R_1$  и  $R_2$  выбирают несколько малыми, что величина тока  $i_{\delta}$  практически не влияет на величину напряжения  $u_{R2}$ . При этом

$$u_{R2} = E_K \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$

В соответствии со вторым законом Кирхгофа  $u_{R_{\delta}} = u_{R2} - u_{бэ}$ .

При воздействии дестабилизирующих факторов величина  $u_{бэ}$  изменяется мало, поэтому мало изменяется и величина  $u_{R_{\delta}}$ . На прак-

тике обычно напряжение  $u_{R_3}$  составляет небольшую долю напряжения  $E_K$ .

#### 2.1.4 Схемы включения усилительных каскадов

Схемотехника усилителей на транзисторах отличается многообразием и сложностью. Однако в этом многообразии можно выделить три основные схемы, на основе которых строятся более сложные схемы. При использовании биполярных транзисторов различают: усилитель с общим эмиттером (ОЭ), усилитель с общей базой (ОБ) и усилитель с общим коллектором (ОК). По переменному напряжению, в этих схемах с общим проводом («корпусом») соединяются, соответственно, эмиттер, база или коллектор транзистора. Под общим проводом («корпусом») подразумевается проводник «общий», как для входной, так – и для выходной цепи каскада.

Схема усилительного каскада на биполярном транзисторе с ОЭ приведена на рисунке 2.13

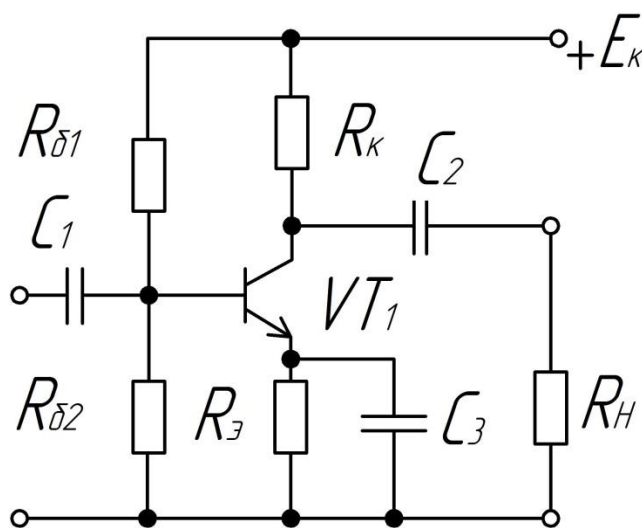


Рисунок 2.13 Схема каскада с ОЭ

Через резисторы (базовый делитель)  $R_{\delta 1}$ ,  $R_{\delta 2}$  на базу транзистора подается напряжение смещения  $U_{бэ} \approx 0,5 \dots 0,8$  В (для кремниевых транзисторов – для германиевых  $U_{бэ} \approx 0,3 \dots 0,4$  В). Это напряжение предназначено для того, чтобы открыть эмиттерный переход и обеспечить постоянный ток коллектора в активном режиме работы транзистора. Величина начального постоянного ток коллектора определяется техническими условиями эксплуатации и для маломощных транзисторов составляет  $I_{кн} = 0,1 \dots 10$  мА. Напряжение питания, как прави-

ло, равно  $5...20\text{ В}$ , а полярность устанавливается такой, чтобы закрыть коллекторный переход. Описанный выше режим по постоянному току (статический режим) – обязательное условие, обуславливающее возможность усиления слабых сигналов в усилителе. Если транзистор закрыт и постоянный ток коллектора равен нулю, то каскад не будет усиливать слабые переменные сигналы.

Совокупность переменных токов и напряжений на элементах каскада определяют режим усилителя по переменному напряжению (динамический режим). Через конденсатор  $C_1$  переменный входной сигнал поступает на базу транзистора и управляет относительно большим током коллектора. Конденсатор  $C_1$  имеет относительно большую емкость. Следовательно, его емкостное сопротивление  $X_{C1} = 1/\omega \cdot C_1$  мало и поэтому он хорошо пропускает переменный входной ток. Основное назначение этого конденсатора – не пропустить на вход усилителя постоянное напряжение, которое может присутствовать во входном сигнале. Поэтому этот конденсатор называется разделительным.

Большая часть переменного тока коллектора через выходной разделительный конденсатор протекает по внешней нагрузке усилителя  $R_H$ . На этой нагрузке выделяется усиленный по мощности переменный сигнал.

Схема усилительного каскада на биполярном транзисторе с ОБ приведена на рисунке 2.14.

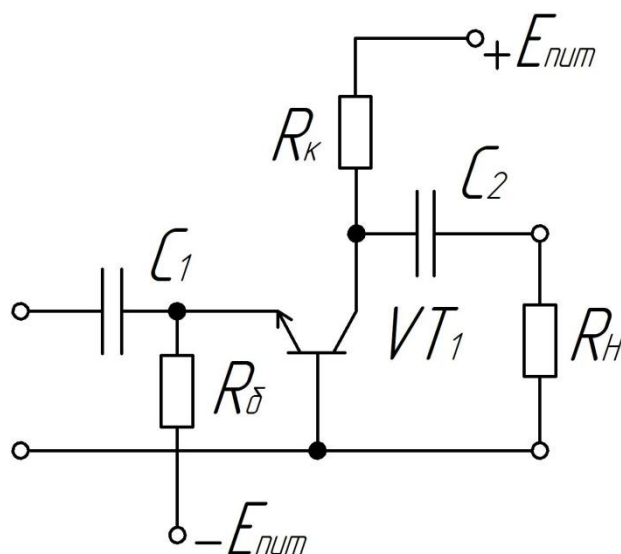


Рисунок 2.14 Схема каскада с ОБ

Назначение разделительных конденсаторов и резисторов в этой схеме аналогично их назначению в схеме с ОЭ. Здесь с общим проводом («корпусом») соединена база транзистора. В отличие от схемы с общим эмиттером, в усилителе с ОБ через резистор  $R_6$  подается отрицательное напряжение смещения. Только при такой полярности напряжения смещения открывается транзистор  $VT1$ , через него начинает протекать постоянный ток и только в этом случае усилитель с ОБ сможет усиливать слабые переменные сигналы.

На рисунке 2.15 приведена схема усилительного каскада на биполярном транзисторе с ОК. В этой схеме коллектор транзистора с общим проводом («корпусом») не соединен. Напротив, на коллекторе присутствует большое постоянное напряжение источника питания. В усилителе с ОК напряжение смещения поступает на базу транзистора через базовый делитель  $R_{\delta 1}$ ,  $R_{\delta 2}$ , также как и в схеме с ОЭ (см. рисунок 2.13).

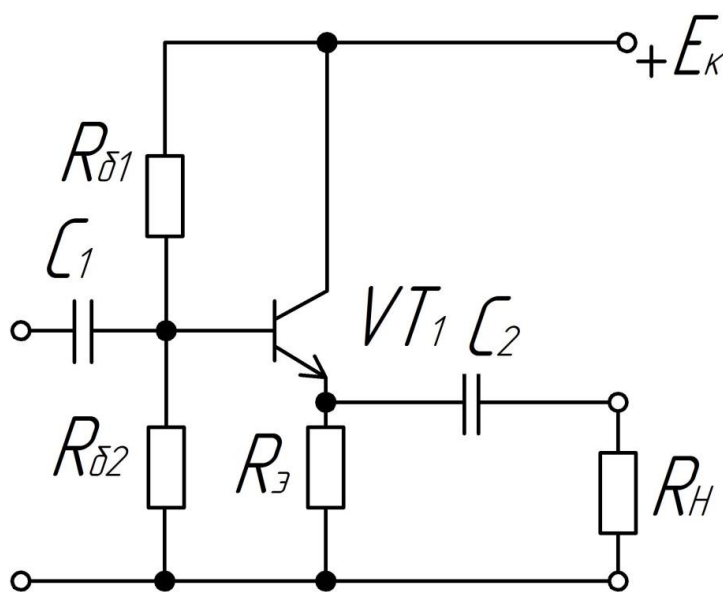


Рисунок 2.15 Схема каскада с ОК

Все элементарные усилительные каскады производят усиление по мощности. Наряду с усилением мощности, в них происходит либо усиление напряжения, либо усиление тока, либо то и другое одновременно. Наибольшее усиление по мощности обеспечивает схема с ОЭ.

В схемах с ОК коэффициент усиления напряжения близок к единице (точнее  $K_u < 1$ ), в результате чего выходной сигнал по величине и фазе повторяет входной ( $U_{\text{вых}} \approx U_{\text{вх}}$ ). Эти каскады называют

повторителями напряжения. Они обладают большим входным и малым выходным сопротивлениями. Вследствие этого повторители используют как согласующие и разделительные каскады, обеспечивающие, без заметного ослабления, передачу сигнала от высокоомных источников к низкоомным нагрузкам (пассивным цепям или усилительным каскадам).

В схемах с ОБ выходной ток примерно равен входному ( $K_i < 1$ ), поэтому эти схемы называют повторителями тока. Повторители тока обладают малым входным сопротивлением, отсутствием усиления по току ( $I_{вых} \approx I_{вх}$ ), и пониженным (по сравнению с ОЭ) усилением по мощности. Все это накладывает определенные ограничения на область применения данных схем. Вместе с тем, схема с ОБ является самой «высокочастотной» из рассмотренных, т.к. обладает минимальными паразитными емкостями. Поэтому повторители тока применяют при усилении сигналов на ВЧ ( $f > 10$  МГц), где становятся заметнее влияние паразитных емкостей.

Легко показать, что  $K_{роз} > K_{роб} \approx K_{рок}$ .

Последнее обстоятельство является основной причиной большого распространения схемы с ОЭ.

Все каскады промежуточного усиления выполняются по схеме ОЭ, однако это не значит, что другие схемы не заслуживают внимания. Малая величина  $R_{вх}$  в схеме с ОБ позволяет легко осуществить токовый режим управления, следовательно, минимизировать нелинейные искажения, связанные с выходной ВАХ. Схема с ОБ обладает наиболее регулируемыми выходными характеристиками, что является залогом усиления с малыми нелинейными искажениями. Вот поэтому, в частности, в усилителях мощности с трансформаторной связью схема с ОБ является самой распространенной. Также известно, что схема с ОБ обладает наибольшей граничной частотой усиления, поэтому незаменима при реализации ВЧ и широкополосных усилителей.

Схема с ОК обладает двумя отличительными свойствами. Во-первых, она превосходит схемы с ОБ и с ОЭ по величине входного сопротивления ( $R_{вхОК} \gg R_{вхОЭ}$  и  $R_{вхОБ}$ ), во-вторых – по величине выходного сопротивления ( $R_{выхОК} \ll R_{выхОЭ}$  и  $R_{выхОБ}$ ). Эти свойства используются при построении входных и выходных каскадов, где данные свойства играют важнейшую роль.

## 2.1.5 Классы работы усилителей

Различают три основных класса работы усилительного каскада – А, В, С. Классы работы усилительных элементов определяются положением рабочей точки на проходной динамической характеристике.

Проходной динамической характеристикой называется зависимость выходного тока от входного напряжения. Для транзистора, включённого по схеме с ОЭ, зависимость будет  $I_k = f(U_{бэ})$ . Проходная динамическая характеристика может быть построена по входной  $I_b = f(U_{бэ})$  и выходным характеристикам транзистора  $I_k = f(U_{кэ})$ .

В режиме работы класса А рабочая точка устанавливается на линейном участке проходной динамической характеристики (рисунок 2.16).

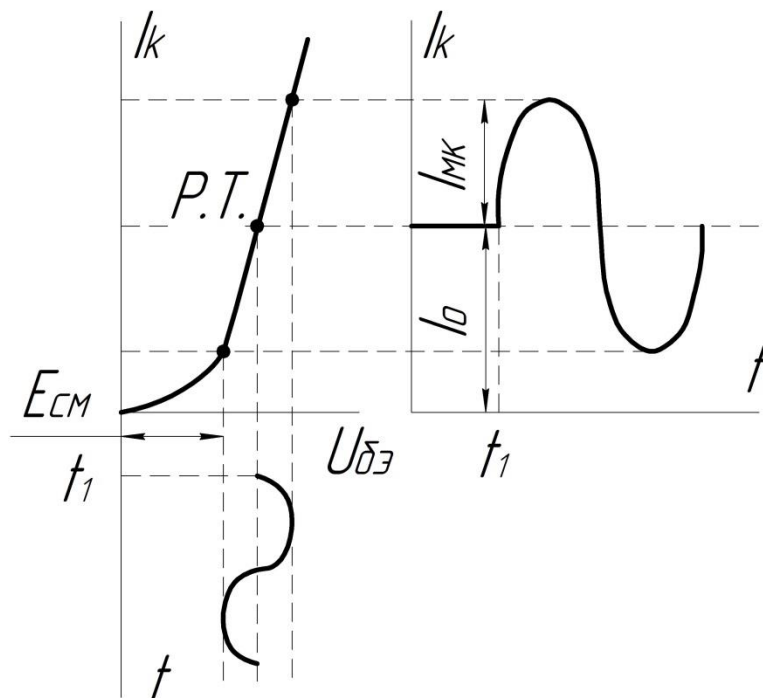


Рисунок 2.16 Режим А

Для этого между базой и эмиттером транзистора при помощи одной из схем питания цепи базы необходимо создать постоянную составляющую напряжения, которая называется величиной напряжения смещения. При отсутствии переменной составляющей усиливаемого сигнала рабочая точка называется рабочей точкой покоя. Нелинейные искажения минимальны. Угол отсечки  $\theta = \pi$  (Углом отсечки называется половина той части периода, за которую в выходной цепи будет протекать ток). Недостатком режима класса А является низкий КПД ( $\eta = (25 - 30 \%)$ ). Это объясняется тем, что энергия от источника питания затрачивается не только на усиление переменной составля-

ющей, но и на создание постоянной составляющей  $I_o$ , которая является бесполезной и в дальнейшем отсеивается разделительным конденсатором. Режим класса А применяется, в основном, в предварительных каскадах усиления.

В режиме класса В рабочая точка выбирается таким образом, чтобы ток покоя был равен нулю (рисунок 2.17). Для режима класса В угол отсечки  $\Theta = \pi$ . Характеризуется режим класса В высоким КПД  $\eta = 60...70\%$ . Недостатком режима класса В являются большие нелинейные искажения. Применяется режим класса В в выходных двухтактных усилителях мощности.

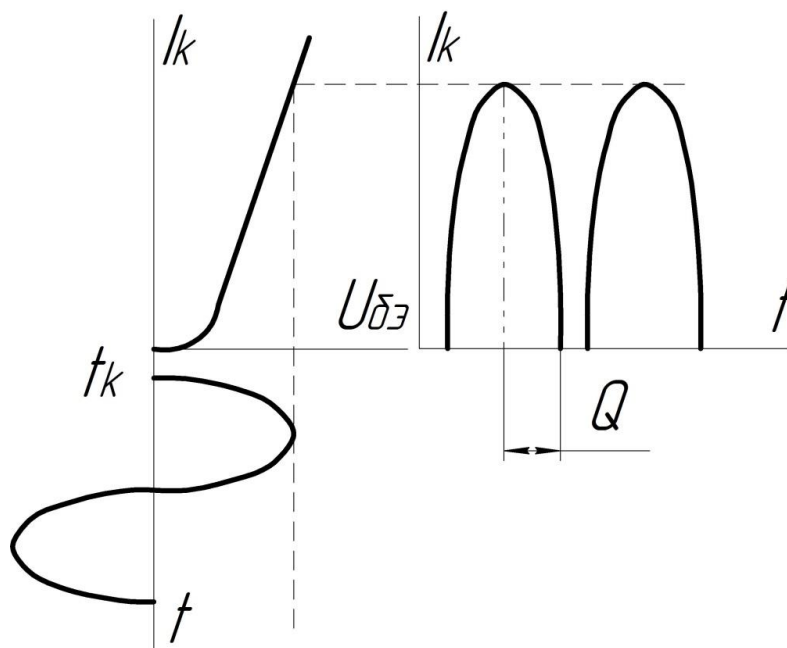


Рисунок 2.17 Режим В

Режим АВ является промежуточным между режимами А и В.

Иногда положение точки покоя в режиме класса АВ выбирается на нижнем изгибе проходной динамической характеристики (рисунок 2.18).

В этом случае будет иметь место ток покоя, но величина его будет значительно меньше, чем в режиме класса А. Угол отсечки  $\Theta$  в режиме класса АВ будет меньше  $\pi$ . Режим класса АВ имеет несколько меньший КПД, чем режим класса В ( $\eta = 50...60\%$ ) и несколько меньшие нелинейные искажения. Применяется так же, как и режим класса В, в двухтактных усилителях мощности.

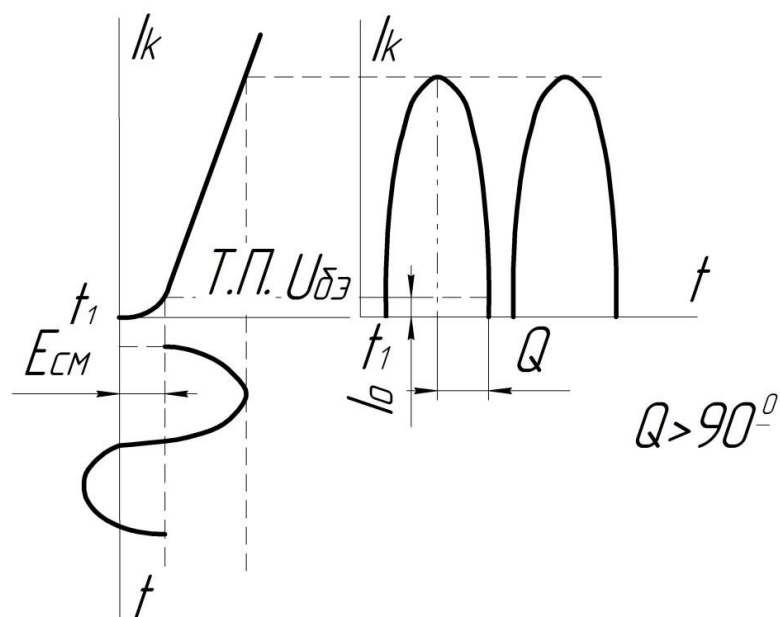


Рисунок 2.18 Режим АВ

В режиме С величина  $E_{см}$  имеет отрицательное значение (рисунок 2.19). В результате этого обеспечивается ток коллектора только для части полуволны входного сигнала.

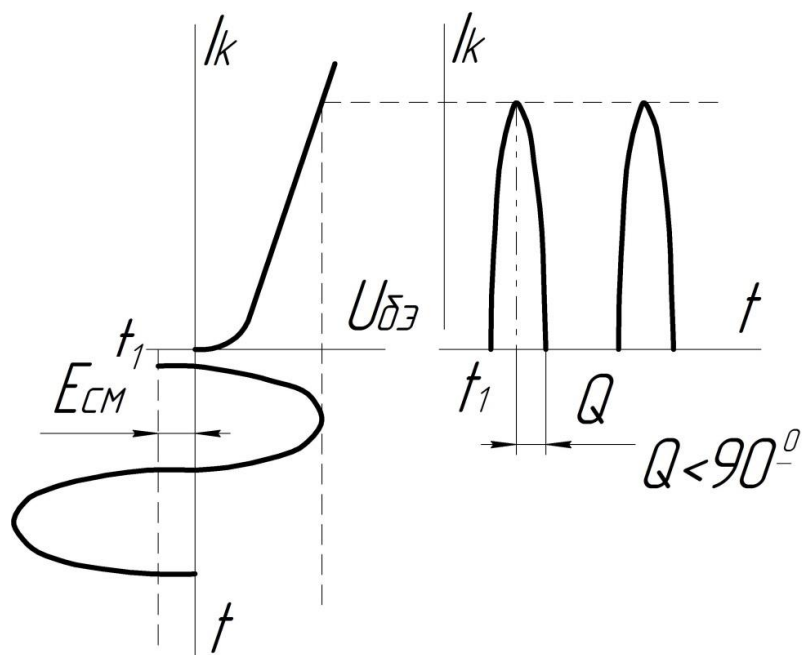


Рисунок 2.19 Режим С

Режим класса С характеризуется максимальным КПД  $\eta = 80 \%$ , но и наибольшими нелинейными искажениями. Использование режима С возможно только в тех случаях, когда искажения не имеют существенного значения, например, в некоторых схемах автоматики.

Режим С в усилителях применяется в выходных каскадах мощных передатчиков.

### 2.1.6 Усилители на полевых транзисторах

В качестве примера рассмотрим  $RC$ -усилитель на полевом транзисторе с  $p$ - $n$ -переходом, включенным с общим истоком (рисунок 2.20). Используем транзистор с каналом  $n$ -типа. Для используемого транзистора начальное напряжение  $u_{из}$  должно быть положительным ( $p$ - $n$ -переход должен находиться под запирающим напряжением). С целью получения этого напряжения в цепь истока включают резистор  $R_{и}$ , на котором возникает падение напряжения  $u_{Ru}$  от протекания по нему начального тока истока  $I_{ин}$ .

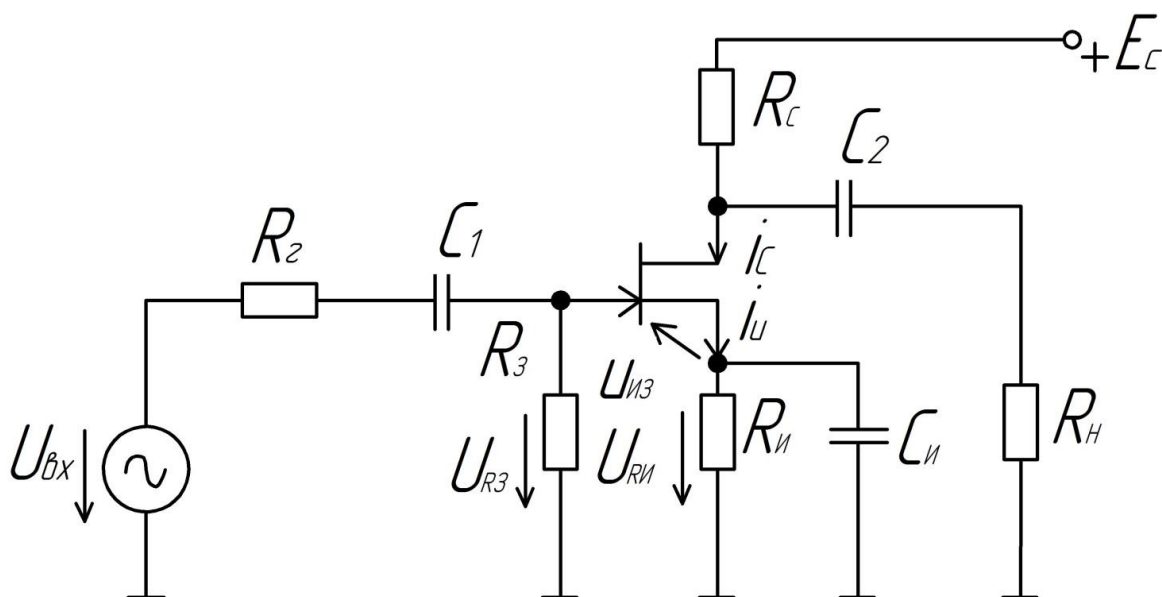


Рисунок 2.20 Усилитель на полевом транзисторе

Напряжение  $u_{Ru}$  через резистор  $R_3$  передается на затвор. Так как ток затвора полевого транзистора пренебрежительно мал, падение напряжения на резисторе  $R_3$  практически равно нулю, поэтому  $u_{из} = u_{Ru}$ .

Рассмотренную схему обеспечения начального режима работы называют схемой с автоматическим смещением.

Пусть задан начальный ток стока ( $I_{CH} = I_{ИН}$ ) и начальное напряжение  $U_{ИЗН}$  между истоком и затвором. Тогда резистор  $R_{и}$  следует выбрать из соотношения

$$R_{и} = \frac{U_{изн}}{I_{сн}}.$$

Резистор  $R_{и}$  обычно выбирают порядка 1 МОм.

Рассматриваемая схема обеспечения начального режима работы характеризуется повышенной стабильностью. Если по каким-либо причинам начальный ток стока  $I_{сн}$  начнет увеличиваться, то это приведет к увеличению напряжений  $U_{ри}$  и  $U_{из}$ , что будет препятствовать значительному увеличению тока  $I_{сн}$ .

Модуль коэффициента усиления каскада в области средних частот определяется равенством

$$K_U = S \cdot \frac{R_c \cdot R_n}{R_c + R_n},$$

где  $S$  – статическая крутизна характеристики полевого транзистора, определяемая по справочникам.

Назначение конденсаторов  $C_1$ ,  $C_2$  и  $C_4$  аналогично назначению соответствующих конденсаторов  $RC$ –усилителя на биполярном транзисторе.

Частотные характеристики рассматриваемого усилителя подобны частотным характеристикам  $RC$ –усилителя на биполярном транзисторе.

### 2.1.7 Многокаскадные усилители

При усилении малых входных сигналов может оказаться, что одного усилительного каскада недостаточно для получения нужного коэффициента усиления. В этом случае задачу решают с помощью многокаскадных усилителей.

Многокаскадным усилителем называется усилитель, получаемый путем последовательного соединения отдельных каскадов (рисунк 2.21).

В многокаскадных усилителях выходной сигнал первого и любого промежуточного каскада служит входным сигналом последующего каскада. Нагрузкой указанных каскадов является входное сопротивление последующего каскада. Входное и выходное сопротивления усилителя определяются соответственно входным и выходным каскадами.

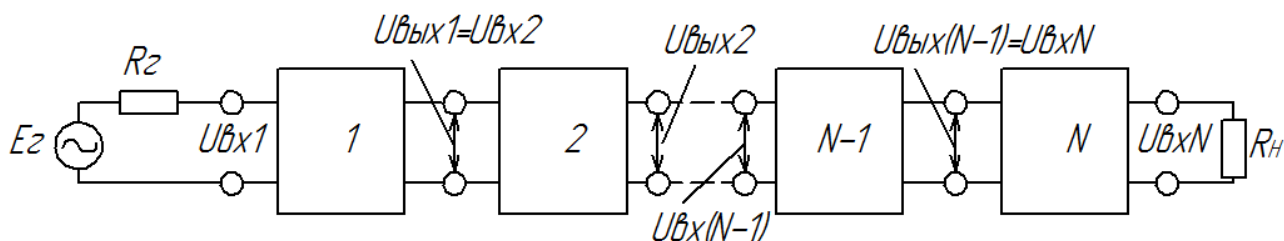


Рисунок 2.21 Структурная схема многокаскадного усилителя

Коэффициент усиления многокаскадного усилителя равен произведению коэффициентов усиления входящих в него каскадов:

$$K_U = \frac{U_n}{E_r} = \frac{U_{\text{вых } 1}}{E_r} \cdot \frac{U_{\text{вых } 2}}{U_{\text{вх } 2}} \cdot \dots \cdot \frac{U_{\text{вых } N}}{U_{\text{вх } N}} = K_{U1} \cdot K_{U2} \cdot \dots \cdot K_{UN}.$$

Связь каскадов в многокаскадном усилителе может осуществляться с помощью конденсатора, трансформатора или непосредственно. В соответствии с этим различают усилители с конденсаторной, трансформаторной и непосредственной связью.

В настоящее время усилители применяются преимущественно в интегральном исполнении с непосредственной связью между каскадами. Исключение составляют узкополосные усилители радиотехнических устройств высокой частоты, где связь усилительных каскадов интегрального исполнения, а также связь источника входного сигнала с входом усилителя и выхода усилителя с нагрузкой могут осуществляться через трансформатор (одна из обмоток которого образует с дополнительно вводимым конденсатором параллельный колебательный контур). Конденсаторы в усилителях интегрального исполнения могут применяться как навесные элементы для связи источника входного сигнала с входом усилителя, выхода усилителя с нагрузкой, а также для связи отдельных усилителей между собой. В качестве элемента связи конденсатор используется в усилителях звуковых частот, усилителях высокой частоты и широкополосных усилителях.

### 2.1.8 Усилители постоянного тока

Усилитель называют усилителем постоянного тока (УПТ), если он может усиливать постоянные и медленно изменяющиеся сигналы. Такой усилитель можно использовать и для усиления переменных сигналов.

Для того, чтобы постоянные или медленно изменяющиеся сигналы могли быть переданы с входа усилителя на его выход, должны использоваться только гальванические связи между отдельными ча-

стями усилителя или эти сигналы должны быть преобразованы в переменные. Полученные переменные сигналы могут быть усилены с помощью усилителей переменного тока, в которых гальванические связи разорваны с помощью конденсаторов или трансформаторов. После усиления переменные сигналы должны быть преобразованы в постоянные или медленно изменяющиеся.

Характерным свойством УПТ является дрейф нуля. Под дрейфом нуля понимают самопроизвольное изменение выходного напряжения при неизменном нулевом входном под действием влияния внешней среды (изменений температуры, питающего напряжения, старения электронных элементов).

Основными методами снижения дрейфа являются жесткая стабилизация источников питания усилителей, использование отрицательных обратных связей, применение балансных компенсационных схем УПТ, использование элементов с нелинейной зависимостью параметров от температуры.

Для устранения отмеченных недостатков УПТ строят в виде параллельно-балансных каскадов, представляющих собой сбалансированный мост, который можно назвать дифференциальным усилителем, схема которого представлена на рисунке 2.22.

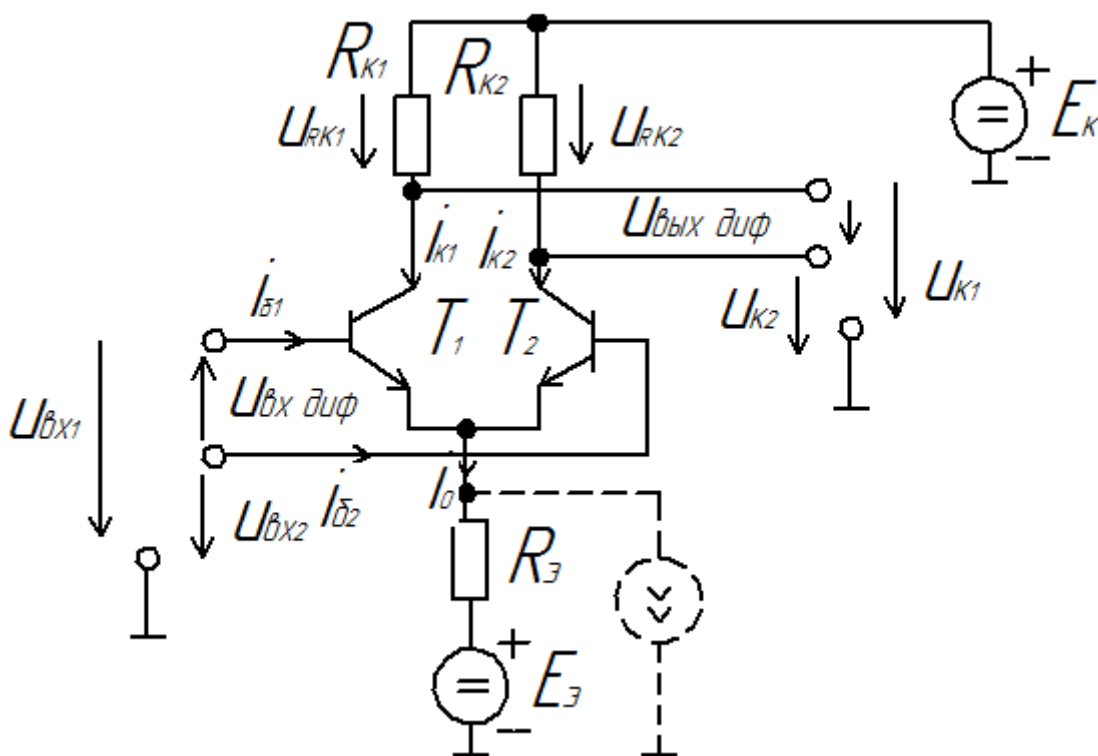


Рисунок 2.22 Дифференциальный усилитель

Основная идея, реализованная в дифференциальном каскаде, состоит в использовании в одном целом двух совершенно одинаковых половин. Это приводит к тому, что выходное напряжение  $u_{\text{вых.диф}}$  очень слабо зависит от входного синфазного напряжения и практически определяется только  $u_{\text{вх.диф}}$ .

Дифференциальное входное напряжение определяется выражением

$$u_{\text{вх.диф}} = u_{\text{вх}2} - u_{\text{вх}1}.$$

Коэффициент усиления по напряжению для дифференциального сигнала  $K_{\text{диф}}$  описывается выражением

$$K_{\text{диф}} = \frac{u_{\text{вых.диф}}}{u_{\text{вх.диф}}} = \frac{\beta \cdot R_{\kappa}}{(\beta + 1) \cdot r_{\text{э}}} \approx \frac{R_{\kappa}}{r_{\text{э}}}.$$

Как известно, при увеличении начального тока в цепи эмиттера величина  $r_{\text{э}}$  уменьшается, а при уменьшении увеличивается. Поэтому при увеличении тока  $i_0$  коэффициент  $K_{\text{диф}}$  увеличивается. Это позволяет изменять коэффициент усиления, изменяя начальный режим работы усилителя.

В усилителях постоянного тока с модуляцией и демодуляцией (усилитель типа МДМ) входной постоянный или медленно изменяющийся сигнал преобразуется (модулируется) в переменный повышенной частоты. Полученный сигнал усиливается с помощью усилителя переменного напряжения, а затем вновь преобразуется (демодулируется) в постоянный или медленно изменяющийся. Частота переменного напряжения часто составляет десятки килогерц.

Структурная схема и временные диаграммы напряжений усилителя типа МДМ приведены на рисунке 2.23.

Модулятор преобразует постоянный или медленно изменяющийся входной сигнал в переменное напряжение с частотой  $f_{\text{он}}$ , определяемой генератором опорного напряжения, и амплитудой, пропорциональной входному сигналу. Переменное напряжение  $u_{\text{м}}$  с выхода модулятора поступает на вход низкочастотного усилителя переменного тока. Демодулятор – фазочувствительный выпрямитель – преобразует переменное напряжение в постоянное, причем величина постоянного напряжения пропорциональна амплитуде переменного напряжения, а следовательно, пропорциональна входному сигналу.

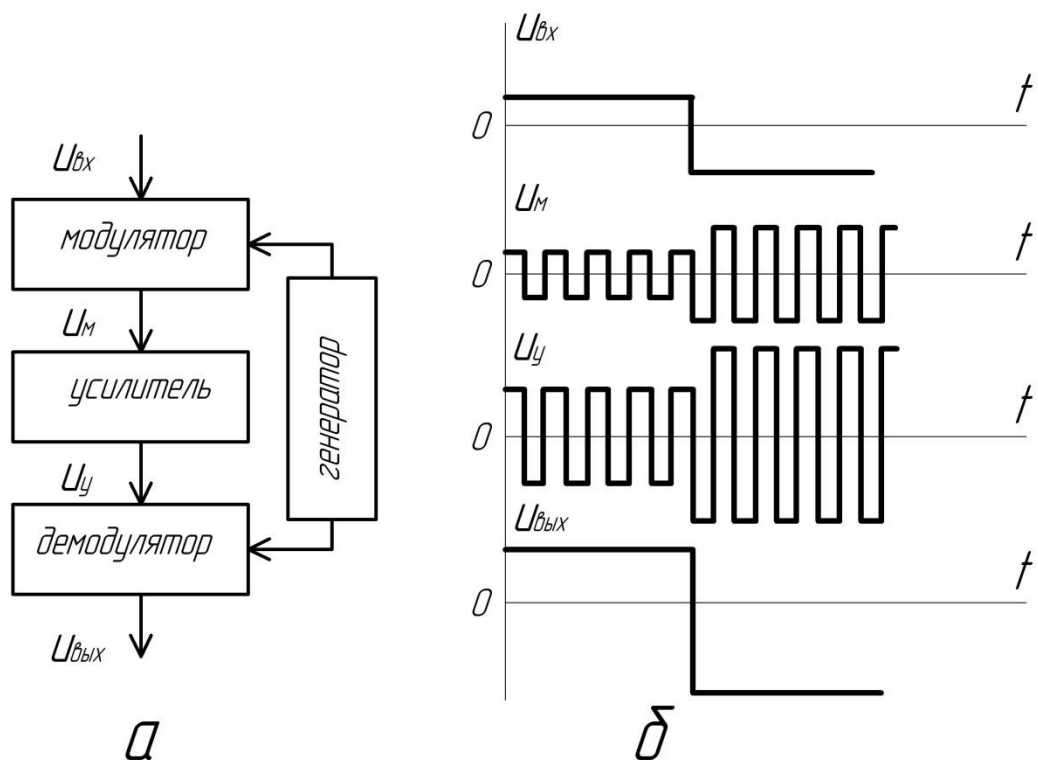


Рисунок 2.23 Усилитель типа МДМ: *а* - структурная схема; *б* - временные диаграммы напряжений

Вследствие того, что в усилителях типа МДМ разорваны гальванические связи между каскадами, удастся достичь высокого качества усиления, так как дрейф нуля в данной схеме отсутствует. Такие усилители могут использоваться в высокоточных (прецизионных) устройствах.

Еще одним достоинством усилителей типа МДМ является возможность изолировать с помощью трансформатора входную и выходную части. Изолирующие усилители широко используются, например, в медицинской электронике.

### 2.1.9 Усилители мощности

Усилителем мощности (мощным выходным усилителем) называют усилитель, предназначенный для обеспечения заданной мощности нагрузки  $P_n$  при заданном сопротивлении нагрузки  $R_n$ . Усилитель мощности является примером устройства силовой электроники. Основная цель таких устройств состоит в том, чтобы отдать нагрузке заданную мощность. Схема бестрансформаторного двухтактного усилителя представлена на рисунке 2.24.

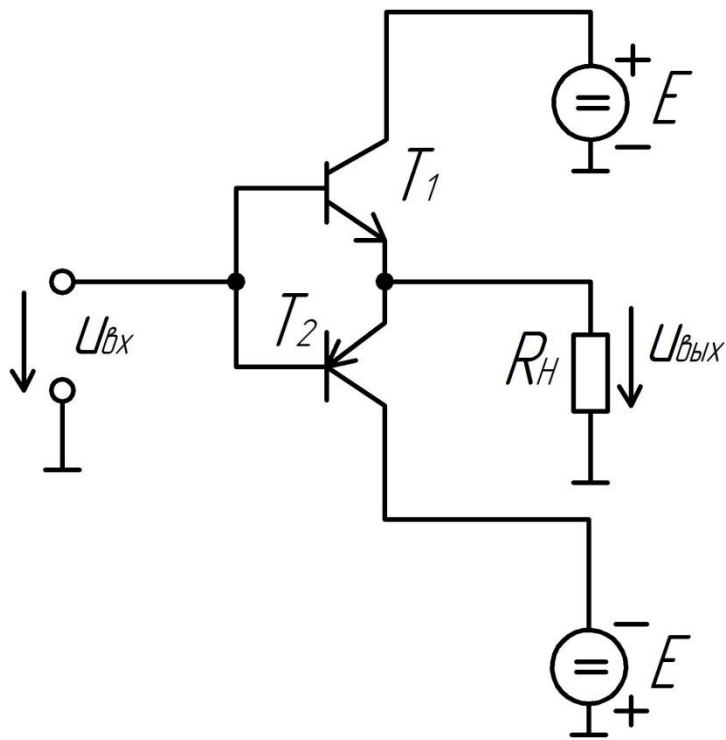


Рисунок 2.24 Бестрансформаторный двухтактный усилитель мощности

Максимально возможная мощность нагрузки определяется выражением

$$P_{н. макс} = \left( \frac{U_m}{\sqrt{2}} \right)^2 \cdot \frac{1}{R_H} = \frac{E^2}{2 \cdot R_H}.$$

При максимальной мощности нагрузки усилитель потребляет от источников питания мощность, определяемую выражением

$$P_{потр. макс} = \frac{2 \cdot E^2}{\pi \cdot R_H}.$$

Отсюда получаем максимально возможный коэффициент полезного действия усилителя

$$\eta_{ макс} = \frac{P_{н. макс}}{P_{потр. макс}} = \frac{\pi}{4} \approx 0,78.$$

Для уменьшения нелинейных искажений обеспечивают некоторое начальное смещение на входах транзисторов и тем самым переводят их в режим класса АВ (рисунок 2.25). При этом коэффициент полезного действия несколько уменьшается.

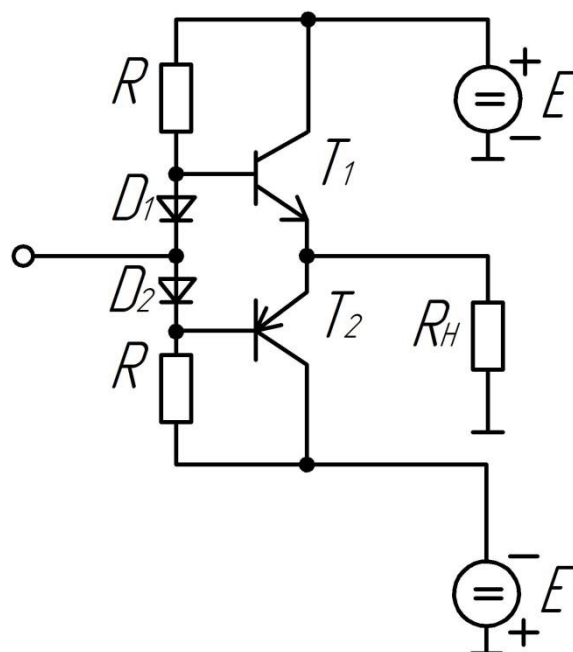


Рисунок 2.25 Двухтактный усилитель АВ-класса

## 2.2 Операционные усилители

### 2.2.1 Условное обозначение, основные характеристики и параметры

Операционный усилитель (ОУ) - это усилитель, имеющий большой коэффициент усиления по напряжению, два входа, причем один из входов инвертирующий и, как правило, один выход. Операционный усилитель обеспечивает усиление как постоянных, так и переменных сигналов. Вначале такие усилители использовались в аналоговых вычислительных устройствах для выполнения математических операций (сложения, вычитания и т. д.). Это объясняет происхождение термина «операционный».

В настоящее время операционные усилители широко используются в виде полупроводниковых интегральных схем. Эти схемы содержат большое число (десятки) элементов (транзисторов, диодов и т. д.), но по размерам и стоимости приближаются к отдельным транзисторам. Основные параметры большинства ОУ в области низких частот следующие: модуль коэффициента усиления по напряжению для любого из входов  $K_0 = 10^4 \dots 10^7$ ; входное сопротивление по любому входу  $R_{BX} = 30 \text{ кОм} \dots 10 \text{ МОм}$ .

Рассмотрим наиболее широко используемые разновидности операционных усилителей, для питания которых применяются два

источника напряжения (обычно  $+15\text{ В}$  и  $-15\text{ В}$ ). По-другому это называется питанием от источника с нулевым выводом или от расщепленного источника.

Условное графическое обозначение операционного усилителя показано на рисунке 2.26.

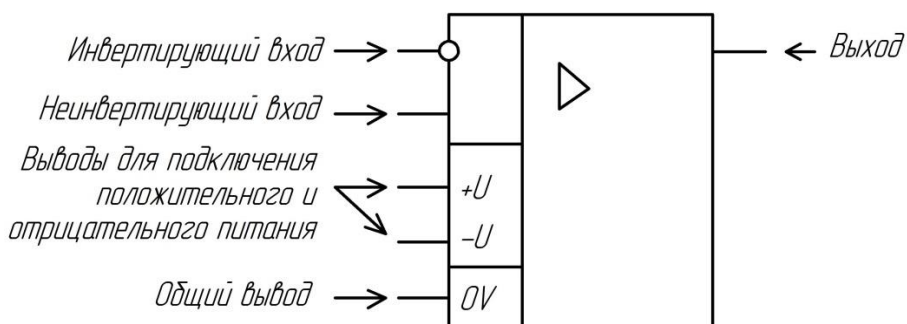


Рисунок 2.26 Графическое обозначение операционного усилителя

Обозначение общего вывода «0V» расшифровывается как «ноль вольт». Для пояснения назначения выводов на рисунке 2.27 приведена типовая схема на операционном усилителе – схема инвертирующего усилителя.

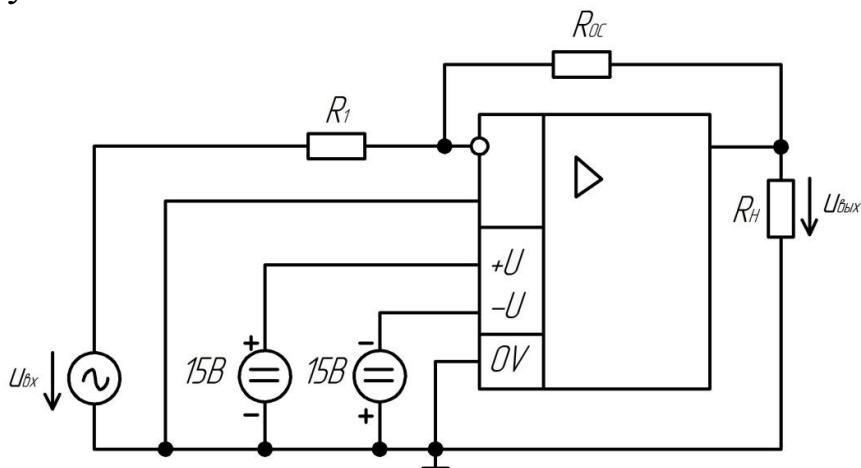


Рисунок 2.27 Инвертирующий усилитель на основе операционного усилителя

Если входное напряжение  $u_{вх}$  достаточно мало по модулю, то выходное напряжение  $u_{вых}$  определяется выражением

$$u_{вых} = -u_{вх} \frac{R_{oc}}{R_1}.$$

Часто на схемах выводы  $+U$ ,  $-U$  и  $0V$  не указывают (но подразумевают) и используют упрощенное условное графическое обозначение (рисунок 2.28). В литературе часто используется условное графическое обозначение ОУ, приведенное на рисунке 2.29.

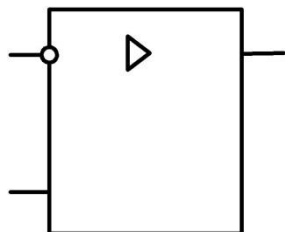


Рисунок 2.28 Упрощенное условное обозначение операционного усилителя

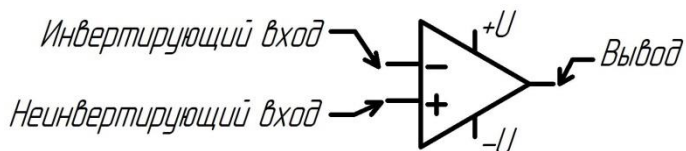


Рисунок 2.29 Условное обозначение ОУ в функциональных схемах

Обозначим напряжения на выводах операционного усилителя (рисунок 2.30).

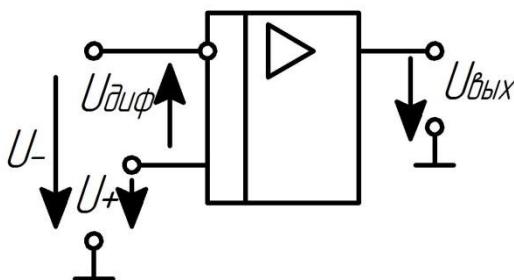


Рисунок 2.30 Операционный усилитель с обозначением входного и выходного напряжений

Напряжение  $u_{диф}$  между инвертирующим и неинвертирующим входами называют дифференциальным напряжением (дифференциальным сигналом). Ясно, что  $u_{диф} = u_+ - u_-$ . Операционные усилители конструируют таким образом, чтобы они как можно больше изменяли напряжение  $u_{вых}$  при изменении дифференциального сигнала (т. е. разности  $u_+ - u_-$ ) и как можно меньше изменяли напряжение  $u_{вых}$  при одинаковом изменении напряжений  $u_+$  и  $u_-$ .

Пусть  $u_{диф}=0$ . Обозначим синфазное напряжение (синфазный сигнал)  $u_{сф} \equiv u_+ = u_-$ . Операционные усилители конструируют таким образом, чтобы влияние синфазного сигнала на выходное напряжение было как можно меньше.

**Передаточная характеристика.** Операционный усилитель хорошо характеризует его передаточная характеристика – зависимость вида

$$u_{\text{вых}} = f(u_{\text{диф}}),$$

где  $f$  – некоторая функция.

График этой зависимости для операционного усилителя К140УД1Б приведен на рисунке 2.31. Эта конкретная характеристика не проходит через начало координат. Значение напряжения  $u_{\text{диф}}$ , при котором выполняется условие  $u_{\text{вых}}=0$ , называют напряжением смещения нуля и обозначают через  $U_{\text{см}}$ . Для операционного усилителя типа К140УД1 известно, что напряжение  $U_{\text{см}}$  лежит в диапазоне от  $-10 \text{ мВ}$  до  $+10 \text{ мВ}$ . А это означает, что при нулевом напряжении  $u_{\text{диф}}$  напряжение  $u_{\text{вых}}$  может лежать в пределах от минимально возможного (около  $-7 \text{ В}$ ) до максимально возможного (около  $+10 \text{ В}$ ).

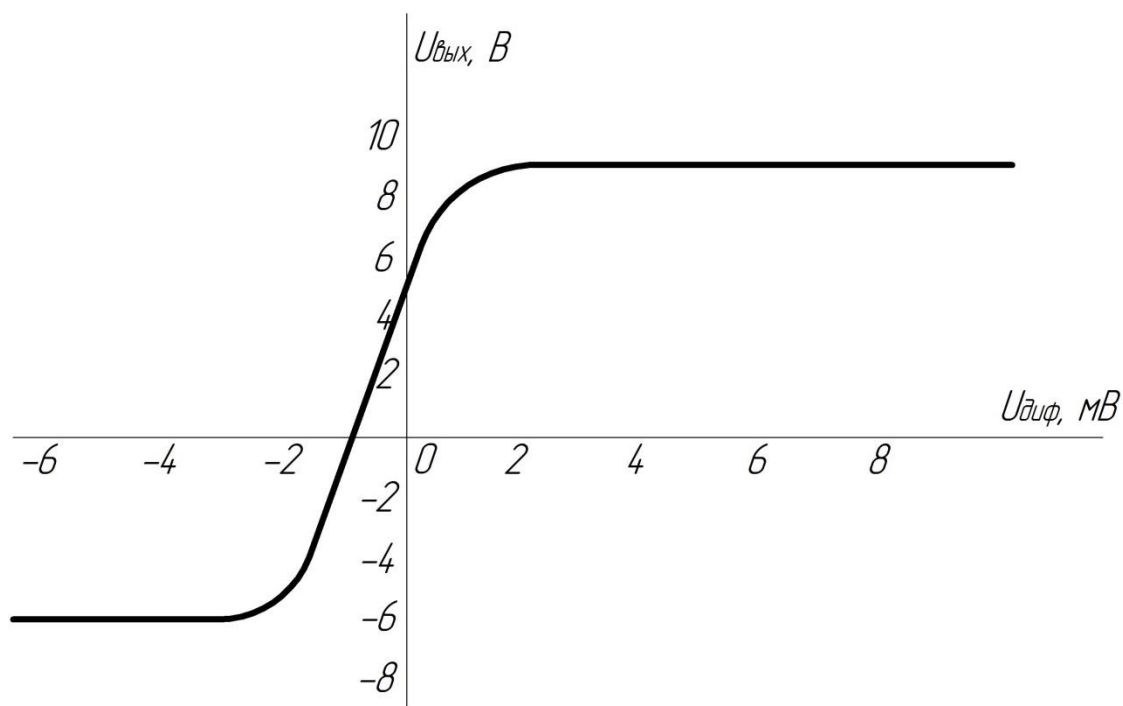


Рисунок 2.31 Передаточная характеристика операционного усилителя К140УД1Б

Для того, чтобы при нулевом сигнале на входе напряжение на выходе было равно нулю, т. е. для того, чтобы передаточная характеристика проходила через начало координат, предусматривают меры по компенсации напряжения смещения (балансировка, коррекция нуля, настройка нуля). В некоторых операционных усилителях для компенсации напряжения смещения предусмотрены специальные вы-

воды. Типовая схема включения операционного усилителя типа К140УД8А, в котором предусмотрены такие выводы, представлена на рисунке 2.32.

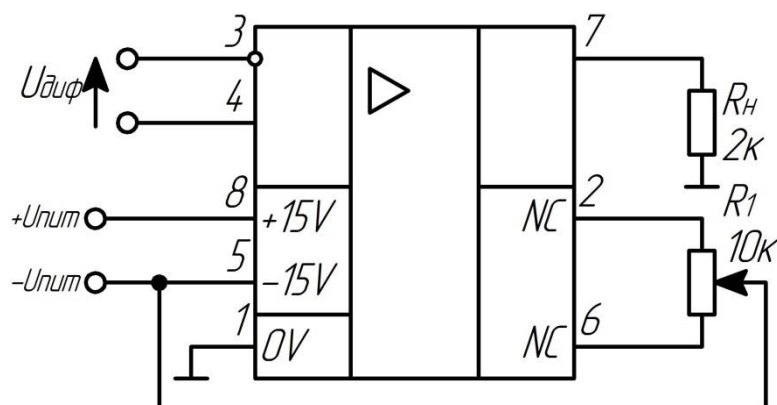


Рисунок 2.32 Схема включения операционного усилителя К140УД8А

Через NC обозначены специальные выводы для балансировки. Цифрами обозначены номера выводов.

Диапазон выходного напряжения, соответствующий почти вертикальному участку передаточной характеристики, называется областью усиления. Соответствующий этому диапазону режим работы называют режимом усиления (линейным, активным режимом). В линейном режиме

$$u_{\text{вых}} = K \cdot u_{\text{диф}},$$

где  $K$  – коэффициент усиления по напряжению (коэффициент усиления напряжения, коэффициент усиления дифференциального сигнала).

Обычно величина  $K$  лежит в пределах  $10^4 \dots 10^5$ . Например, для операционного усилителя типа К140УД1Б  $K = 1350 \dots 12000$ , для операционного усилителя К140УД14А  $K$  не менее 50000.

Диапазоны выходного напряжения вне области усиления называются областями насыщения. Соответствующий этим областям режим называют режимом насыщения.

Реальные электронные устройства на основе операционных усилителей практически всегда имеют коэффициент усиления значительно меньше  $K$ , так как в них используется отрицательная обратная связь.

## 2.2.2 Линейные схемы на основе операционных усилителей

Операционные усилители в настоящее время используются в самых различных электронных устройствах. Их широко применяют как в аналоговых, так и в импульсных устройствах электроники. В то же время существуют и часто используются типовые линейные схемы на основе операционных усилителей.

При создании схем с операционными усилителями используется ряд допущений, принимаемых в предположении, что используемые операционные усилители достаточно близки к идеальным.

Примем следующие допущения:

1) входное сопротивление ОУ равно бесконечности, токи входных электродов равны нулю ( $R_{вх} \rightarrow \infty$ ,  $i_+ = i_-$ );

2) выходное сопротивление ОУ равно нулю, т. е. ОУ со стороны выхода является идеальным источником напряжения ( $R_{вых}=0$ );

3) коэффициент усиления по напряжению (коэффициент усиления дифференциального сигнала) равен бесконечности, а дифференциальный сигнал в режиме усиления равен нулю (при этом не допускается закорачивание выводов ОУ);

4) в режиме насыщения напряжение на выходе равно по модулю напряжения питания, а знак определяется полярностью входного напряжения;

5) синфазный сигнал не действует на ОУ;

6) напряжение смещения нуля равно нулю.

Рассмотрим схему инвертирующего усилителя (рисунок 2.33), из которого видно, что в ней действует параллельная обратная связь по напряжению.

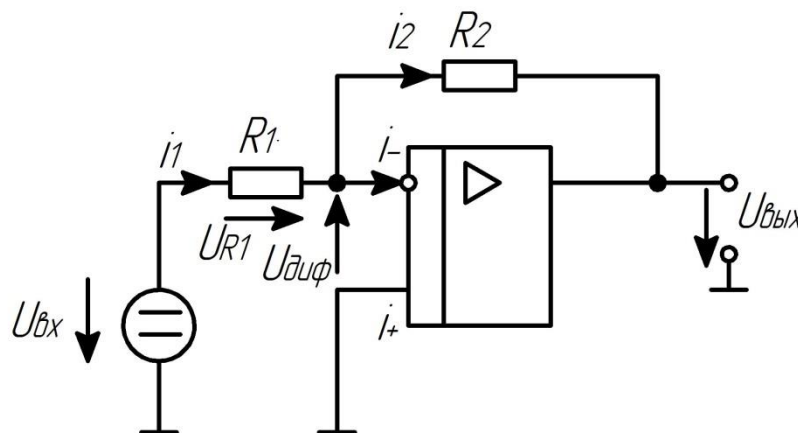


Рисунок 2.33 Инвертирующий усилитель с параллельной обратной связью по напряжению

Так как  $i = 0$ , то в соответствии с первым законом Кирхгофа  $i_1 = i_2$ .

Если ОУ работает в режиме усиления, то  $u_{\text{диф}} = 0$ . В соответствии с этим на основании второго закона Кирхгофа получим

$$i_1 = \frac{u_{\text{вх}}}{R_1}, \quad i_2 = -\frac{u_{\text{вых}}}{R_2}.$$

Учитывая, что  $i_1 = i_2$ , получаем

$$u_{\text{вых}} = -u_{\text{вх}} \frac{R_2}{R_1}.$$

Например, если  $R_1 = 1 \text{ кОм}$ ,  $R_2 = 10 \text{ кОм}$ , тогда  $u_{\text{вых}} = -10 \cdot u_{\text{вх}}$ .

Для уменьшения влияния входных токов ОУ на выходное напряжение в цепь неинвертирующего входа включают резистор  $R_3$  (рисунок 2.34), которое определяется из выражения

$$R_3 = R_1 // R_2 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}.$$

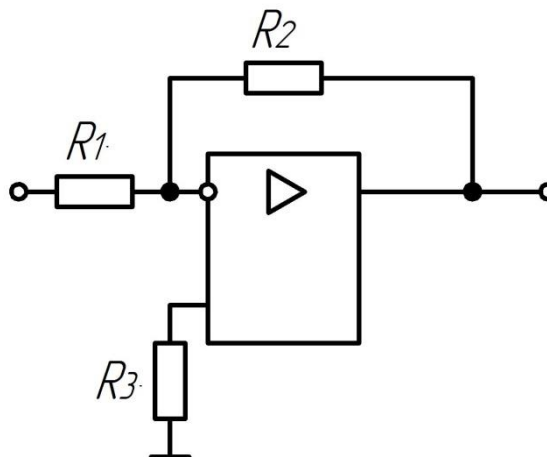


Рисунок 2.34 Операционный усилитель с обратной связью

Входное сопротивление инвертирующего усилителя на низких частотах значительно ниже собственного входного сопротивления ОУ. Это подтверждает вывод о том, что параллельная отрицательная обратная связь уменьшает входное сопротивление.

Учитывая, что  $u_{\text{диф}} \approx 0$ , входное сопротивление усилителя на низких частотах приблизительно равно  $R_1$ .

Выходное сопротивление инвертирующего усилителя на низких частотах  $R_{\text{вых.ос}}$  существенно меньше выходного сопротивления на низких частотах  $R_{\text{вых}}$  собственно операционного усилителя. Это явля-

ется следствием действия отрицательной обратной связи по напряжению.

Можно показать, что

$$R_{\text{вх.о.с.}} = \frac{R_{\text{вх.}}}{1 + K \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}},$$

где  $K$  – коэффициент усиления по напряжению ОУ.

Схема неинвертирующего усилителя приведена на рисунке 2.35, где имеет место последовательная связь по напряжению.

В соответствии с ранее принятыми допущениями входные токи ОУ равны нулю, т. е.  $i_- = i_+ = 0$  и, следовательно,  $i_1 = i_2$ . Если ОУ работает в режиме усиления, тогда  $u_{\text{диф}} = 0$ .

На основании второго закона Кирхгофа получаем

$$u_{R1} = -u_{\text{вх}}, \quad u_{R2} = u_{\text{вх}} - u_{\text{вых}}.$$

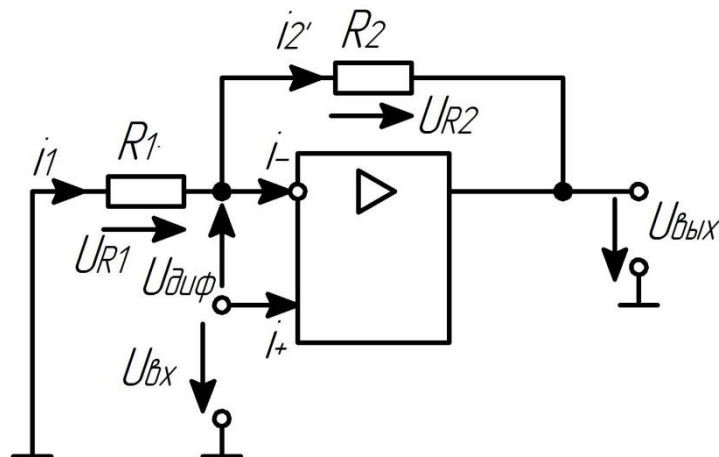


Рисунок 2.35 Неинвертирующий усилитель на основе ОУ

Неинвертирующий усилитель характеризуется коэффициентом усиления по напряжению

$$K_u = 1 + \frac{R_2}{R_1}.$$

Коэффициент усиления усилителя, охваченный обратной связью, определяется выражением

$$K_{u.о.с.} = \frac{K_u}{1 + K_u \cdot \beta}. \quad \text{При } K_u \rightarrow \infty, \quad K_{u.о.с.} = \frac{1}{\beta}.$$

Коэффициент  $\beta$  определяется выражением  $\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2}.$

Таким образом, при  $K_u \rightarrow \infty$   $K_{u.oc} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$ .

Пусть, например,  $R_1 = 2 \text{ кОм}$ ,  $R_2 = 4 \text{ кОм}$  и  $u_{ex} = 2 \text{ В}$ .

Тогда  $u_{вых} = 2 \cdot \left(1 + \frac{4 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^3}\right) = 6 \text{ В}$ .

Входное сопротивление неинвертирующего усилителя на ОУ с обратной связью

$$R_{ex.oc} = R_{ex} \cdot \left(1 + K_u \frac{R_1}{R_1 + R_2}\right),$$

причем при  $K \rightarrow \infty$   $R_{ex.oc} \rightarrow \infty$ .

На входах операционного усилителя, использующегося в неинвертирующем усилителе, имеется синфазный сигнал, равный напряжению  $u_{ex}$ . Это недостаток такого усилителя. В инвертирующем усилителе синфазный сигнал отсутствует.

Схема повторителя (рисунок 2.36) легко может быть получена из схемы неинвертирующего усилителя при  $R_1 \rightarrow \infty$ ,  $R_2 \rightarrow 0$ .

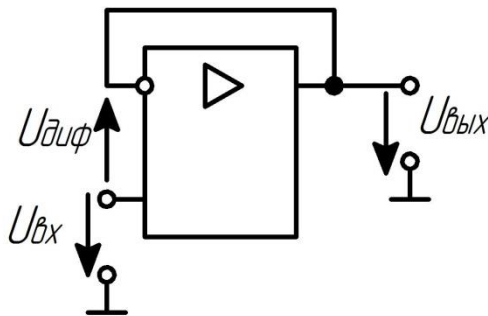


Рисунок 2.36 Повторитель напряжения на основе ОУ

Здесь предполагается, что операционный усилитель работает в режиме усиления ( $u_{диф} \approx 0$ ). Используя второй закон Кирхгофа, получаем  $u_{вых} = u_{ex}$ .

Рассмотрим схему сумматора, приведенную на рисунок 2.37.

Предположим, что операционный усилитель работает в режиме усиления, тогда  $u_{диф} \approx 0$ . Учитывая, что  $i_- = i_+ = 0$ , получим  $\sum_{j=1}^n i_j = i_{oc}$ .

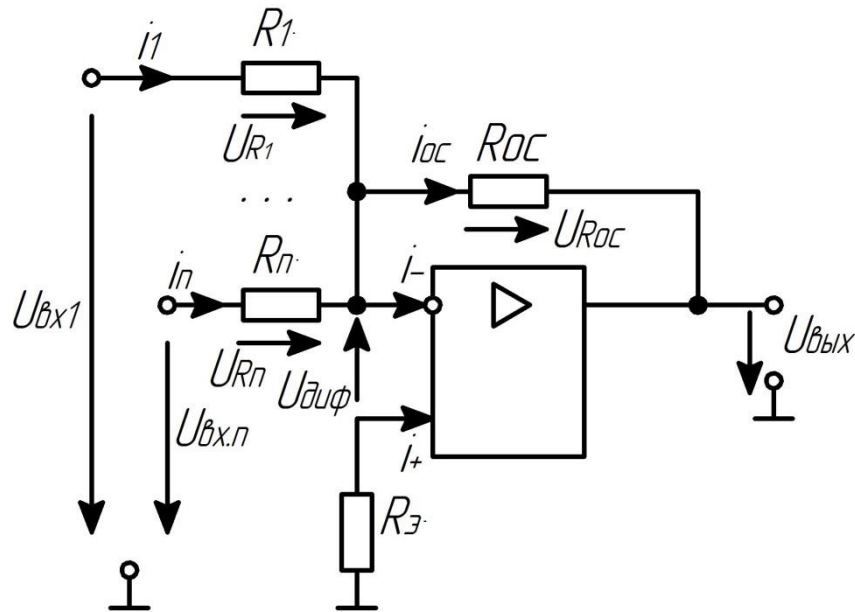


Рисунок 2.37 Сумматор напряжения (инвертирующий сумматор)

При  $u_{\text{диф}} \approx 0$  получим  $u_{Rj} = u_{\text{ex}j}$ ,  $j = 1, \dots, n$ ;  $u_{Roc} = u_{\text{вых}}$ . На основании этих выражений после несложных преобразований получаем

$$u_{\text{вых}} = -R_{oc} \cdot \sum_{j=1}^n \frac{u_{\text{ex}} \cdot j}{R_j}.$$

Для уменьшения влияния входных токов ОУ в цепь неинвертирующего входа включают резистор с сопротивлением

$$R_3 = R_1 // R_2 // \dots // R_n // R_{oc}.$$

В вычитающем усилителе (рисунок 2.38) один входной сигнал подается на инвертирующий вход, а второй – на неинвертирующий.

Предположим, что ОУ работает в линейном режиме. Тогда все устройство можно считать линейным и для анализа принцип суперпозиции (наложения).

Если  $u_{\text{ex}2} = 0$ , тогда соответствующее выходное напряжение  $u'_{\text{вых}}$  будет определяться выражением, соответствующим инвертирующему усилителю:

$$u'_{\text{вых}} = -u_{\text{ex}1} \frac{R_2}{R_1}.$$

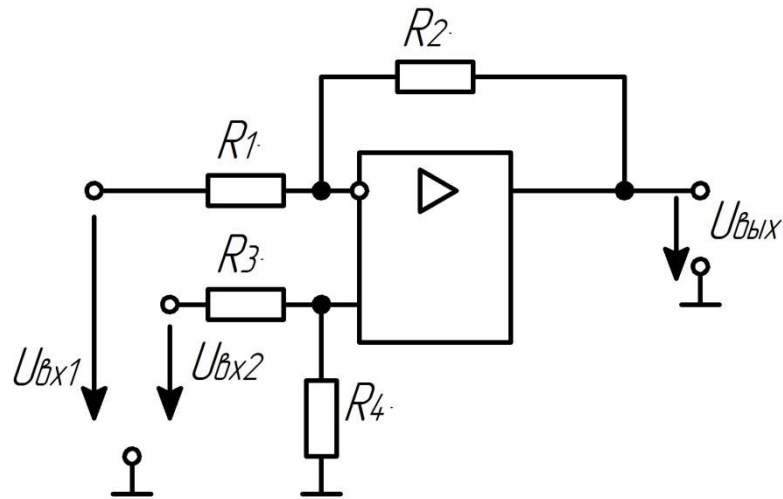


Рисунок 2.38 Вычитающий усилитель с дифференциальным входом

Если  $u_{bx1} = 0$ , определим напряжение на выходе  $u''_{byx}$ . Для оценки воздействия напряжения  $u_{bx2}$  целесообразно на основе теоремы об эквивалентном генераторе преобразование цепи, подключенной к (рисунок 2.39).

Как следует из теоремы,

$$u_{\text{экс}} = u_{\text{ex}2} \frac{R_4}{R_3 + R_4}, \quad R_{\text{экс}} = R_3 // R_4 = \frac{R_3 \cdot R_4}{R_3 + R_4}.$$

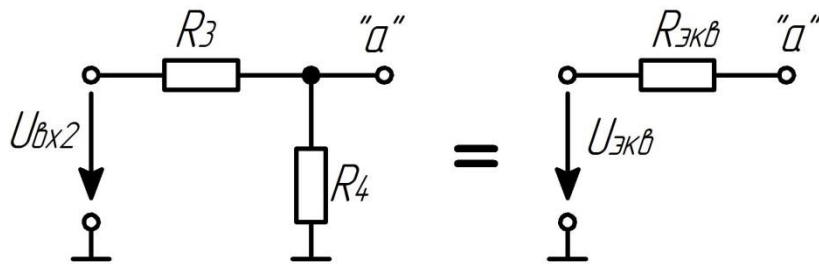


Рисунок 2.39 Эквивалентная схема цепи, подключенной к неинвертирующему входу

В соответствии с принципом суперпозиции, общее напряжение на выходе  $u_{byx}$  определяется из выражения

$$u_{byx} = u''_{byx} + u'_{byx} = u_{\text{ex}2} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) - u_{\text{ex}1} \frac{R_2}{R_1},$$

при  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$  
$$u_{byx} = u_{\text{ex}2} - u_{\text{ex}1}$$

Интегратором называется электронное устройство, выходной сигнал которого пропорционален интегралу по времени от его входного сигнала.

Простейшая схема интегратора, выполненная на ОУ, приведена на рисунке 2.40.

Данная схема является инвертирующим усилителем, в цепь обратной связи которого включен конденсатор  $C$ . Выходное напряжение интегратора будет определяться по следующей зависимости:

$$u_{\text{вых}} = - \frac{1}{RC} \int u_{\text{вх}} dt .$$

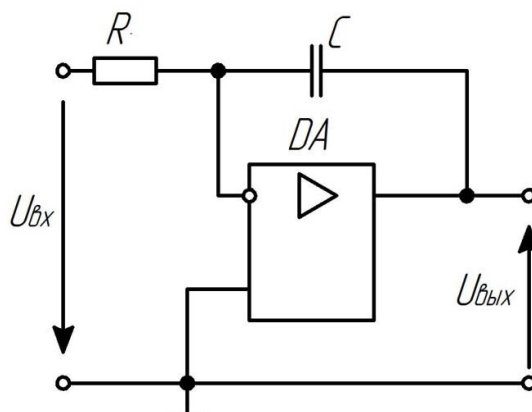


Рисунок 2.40 Интегратор на операционном усилителе

Дифференциатором называется устройство, выходной сигнал которого пропорционален производной от его входного сигнала. Другими словами, выходной сигнал дифференциатора пропорционален скорости изменения его входного сигнала.

Простейшая схема дифференциатора, выполненная на ОУ, приведена на рисунке 2.41.

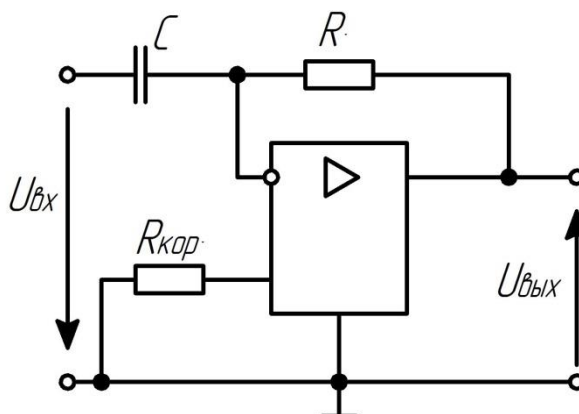


Рисунок 2.41 Дифференциатор

Данная схема является инвертирующим усилителем, в цепь обратной связи которого включено  $RC$  звено. Выходное напряжение дифференциатора будет определяться по следующей зависимости:

$$u_{\text{вых}} = -R \cdot C \frac{du_{\text{вх}}}{dt}.$$

## 2.3 Электронные фильтры

### 2.3.1 Общие сведения

Фильтром называют устройство, которое передает (пропускает) синусоидальные сигналы в одном определенном диапазоне частот (в полосе пропускания) и не передает (задерживает) их в остальном диапазоне частот (в полосе задерживания). Фильтры используют для передачи не только синусоидальных сигналов, но, определяя полосы пропускания и задерживания, ориентируются именно на синусоидальные сигналы. Зная, как фильтр передает синусоидальные сигналы, обычно достаточно легко определить, как он будет передавать сигналы и другой формы.

В устройствах электроники, широко использующих фильтры, различают аналоговые и цифровые фильтры. В аналоговых фильтрах обрабатываемые сигналы не преобразуют в цифровую форму, а в цифровых фильтрах перед обработкой сигналов осуществляют такое преобразование.

Аналоговые фильтры строят на основе как пассивных элементов (конденсаторов, катушек индуктивности, резисторов), так и активных элементов (транзисторов, операционных усилителей). Для аналоговой фильтрации широко используют также электромеханические фильтры: пьезоэлектрические и механические. В пьезоэлектрических фильтрах используют естественный и искусственный кварц, а также пьезокерамику. Основу механического фильтра составляет то или иное механическое устройство.

Важно различать требования, предъявляемые к фильтрам силовой и информативной (информационной) электроники. Фильтры силовой электроники должны иметь как можно больший коэффициент полезного действия. Для них очень важной является проблема уменьшения габаритных размеров. Такие фильтры строятся на основе только пассивных элементов. К фильтрам силовой электроники отно-

сятся сглаживающие фильтры выпрямителей, проходные фильтры силовых трансформаторов и т. д.

Фильтры информативной электроники чаще разрабатывают при использовании активных элементов. При этом широко используют операционные усилители.

Фильтры, содержащие активные элементы, называют активными. В современных конструкциях фильтров обычно не используют катушки индуктивности из-за их больших габаритов и высокой трудоемкости изготовления. Поэтому активные фильтры могут быть изготовлены с применением технологии интегральных микросхем. Нередко активные фильтры оказываются дешевле соответствующих фильтров на пассивных элементах и занимают меньшие объемы. Активные фильтры способны усиливать сигнал, лежащий в полосе пропускания. Во многих случаях их достаточно легко настроить.

К недостаткам активных фильтров можно отнести:

- использование источника питания;
- невозможность работы на высоких частотах, на которых используемые операционные усилители не способны усиливать сигнал.

### 2.3.2 Классификация фильтров

**Фильтры нижних частот.** Для фильтров нижних частот (ФНЧ) характерно то, что входные сигналы низких частот, начиная с постоянных сигналов, передаются на выход, а сигналы высоких частот задерживаются. На рисунке 2.42, *а* показана характеристика идеального (не реализуемого на практике) фильтра (ее иногда называют характеристикой типа «кирпичная стена»). А на рисунке 2.43, *б* представлена характеристика реального фильтра.

Полоса пропускания лежит в пределах от нулевой частоты до частоты среза  $\omega_c$ . Обычно частоту среза определяют как частоту, на которой величина  $A(\omega)$  равна 0,707 от максимального значения (т. е. меньше максимального значения на 3 дБ).

Полоса задерживания (подавления) начинается от частоты задерживания  $\omega_z$  и продолжается до бесконечности. В ряде случаев частоту задерживания определяют как частоту, на которой величина  $A(\omega)$  меньше максимального значения на 40 дБ (т. е. меньше в 100 раз).

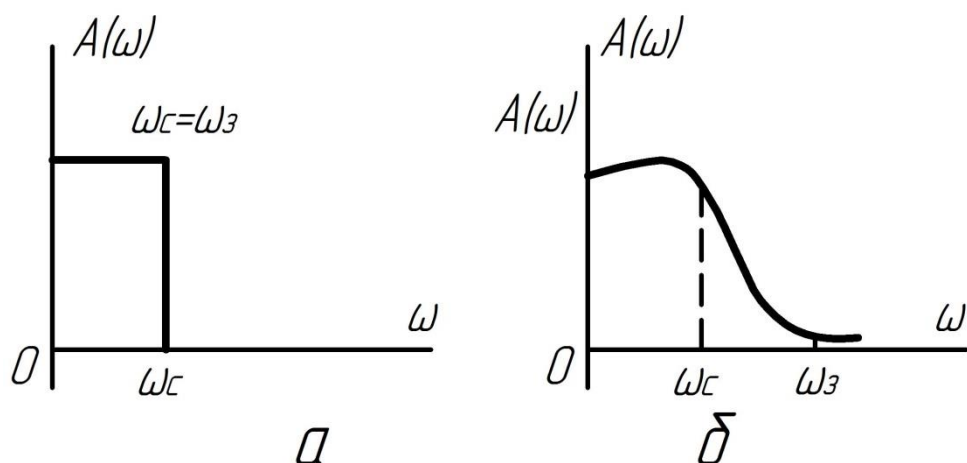


Рисунок 2.42 Амплитудно-частотные характеристики фильтров нижних частот: *а* – идеальная характеристика; *б* - реальная характеристика

Между полосами пропускания и задерживания у реальных фильтров расположена переходная полоса. У идеального фильтра переходная частота отсутствует.

**Фильтры верхних частот.** Фильтр верхних частот характерен тем, что он пропускает сигналы верхних и задерживает сигналы нижних частот.

На рисунке 2.43,*а* приведена идеальная (нереализуемая) амплитудно-частотная характеристика фильтра нижних частот, а на рисунке 2.43,*б* – одна из типичных реальных. Через  $\omega_c$  и  $\omega_z$  обозначены частоты среза и задерживания.

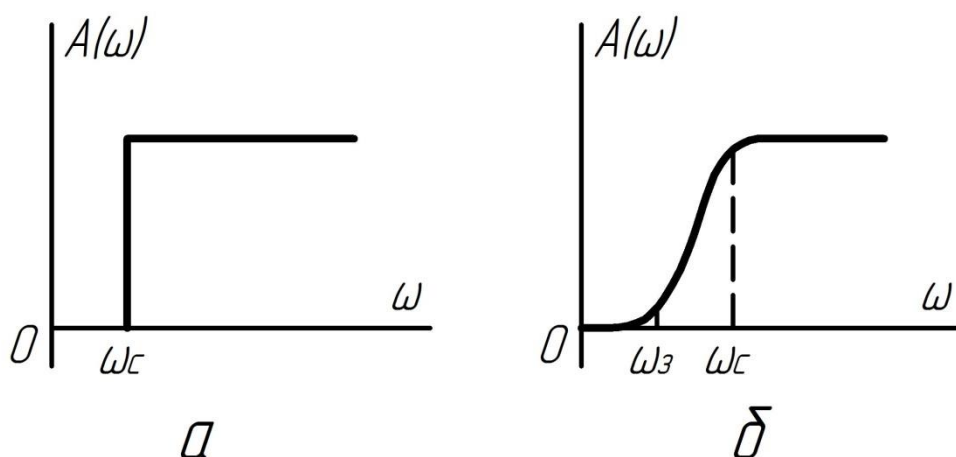


Рисунок 2.43 Амплитудно-частотные характеристики фильтра верхних частот: *а* – идеального фильтра; *б* – реального фильтра

**Полосовые фильтры (полосно-пропускающие).** Полосовой фильтр пропускает сигналы одной полосы частот, расположенной в некоторой внутренней части оси частот. Сигналы с частотами вне этой полосы фильтр задерживает.

На рисунке 2.44,*а* приведена амплитудно-частотная характеристика идеального (нереализуемого) фильтра и одна из типичных реальных характеристик (рисунок 2.44,*б*).

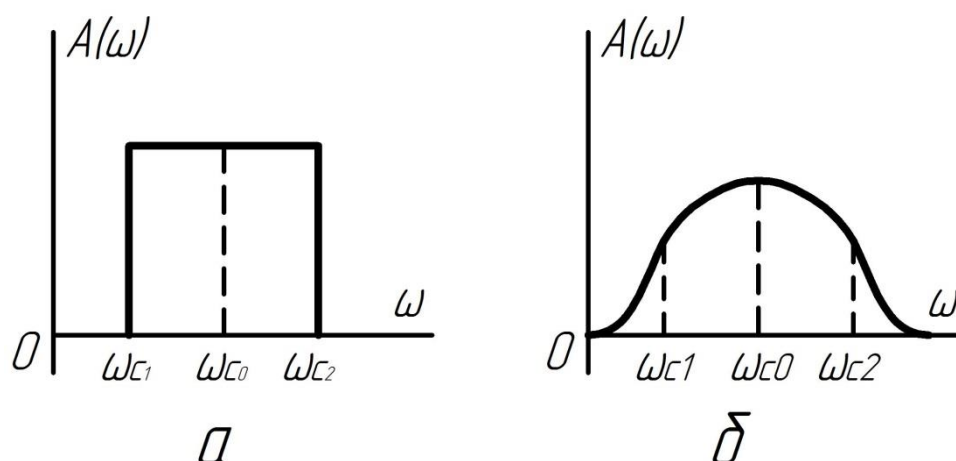


Рисунок 2.44 Амплитудно-частотные характеристики полосового фильтра: *а* - идеальная характеристика; *б* - реальная характеристика

Через  $\omega_{c1}$  и  $\omega_{c2}$  обозначены две частоты среза,  $\omega_0$  – средняя частота. Она определяется выражением

$$\omega_0 = \sqrt{\omega_{c1} \cdot \omega_{c2}} .$$

**Режекторные фильтры (полосно-заграждающие).** Режекторные фильтры не пропускают (задерживают) сигналы, лежащие в некоторой полосе частот, и пропускают сигналы с другими частотами.

Амплитудно-частотная характеристика идеального (нереализуемого) фильтра приведена на рисунок 2.45,*а*. На рисунке 2.45,*б* показана одна из типичных реальных характеристик.

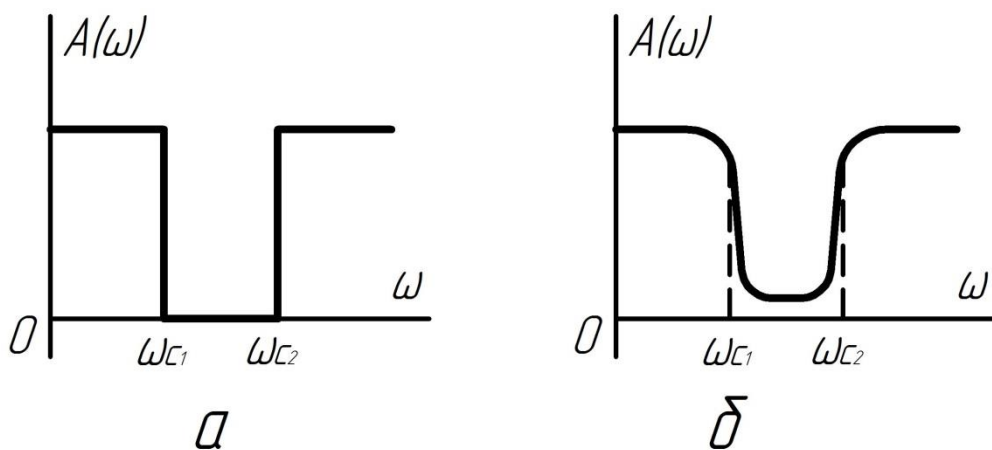


Рисунок 2.45 Амплитудно-частотные характеристики режекторного фильтра: *а* – идеальная характеристика; *б* - реальная характеристика

**Все пропускающие фильтры (фазовые корректоры).** Эти фильтры пропускают сигналы любой частоты. Такие фильтры используются в некоторых электронных системах для того, чтобы изменить с той или иной целью фазочастотную характеристику всей системы (рисунок 2.46).

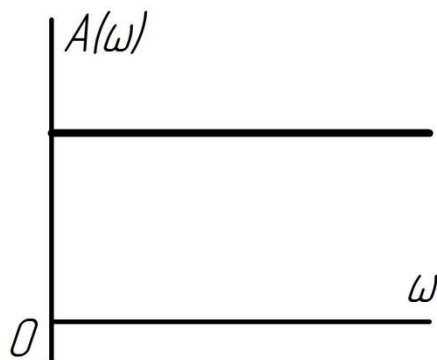


Рисунок 2.46 Амплитудно-частотная характеристика все пропускающего фильтра

**Активные фильтры.** Приведем в качестве примера две схемы фильтров второго порядка. Схема фильтра нижних частот приведена на рисунке 2.47. Можно отметить, что на низких частотах (и на постоянном токе) фильтр имеет коэффициент усиления, который описывается следующим выражением:

$$K_A = 1 + \frac{(K - 1) \cdot R}{R},$$

где  $K$  – величина, определяющая сопротивление в цепи обратной связи  $(K-1) \cdot R$  (рисунок 2.47).

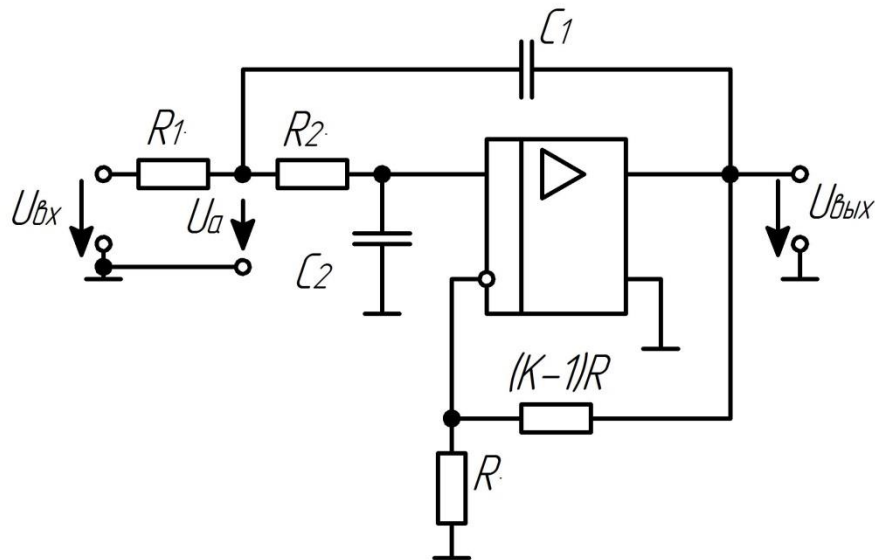


Рисунок 2.47 Активный фильтр нижних частот

Приведенное выражение соответствует неинвертирующему усилителю. При увеличении частоты входного сигнала напряжение на выходе уменьшается во-первых, в связи с уменьшением напряжения на неинвертирующем входе (т.е. на емкости  $C_2$ ) из-за уменьшения модуля комплексного сопротивления емкости  $C_2$ . Во-вторых, уменьшается напряжение  $u_a$  из-за того, что модуль комплексного сопротивления емкости  $C_1$  уменьшается и через эту емкость с выхода усилителя в точку «а» подается ток, который значительно сдвинут по фазе относительно напряжения  $u_{вх}$ .

Фильтр верхних частот представлен на рисунке 2.48. На высоких частотах коэффициент усиления фильтра равен  $K$ .

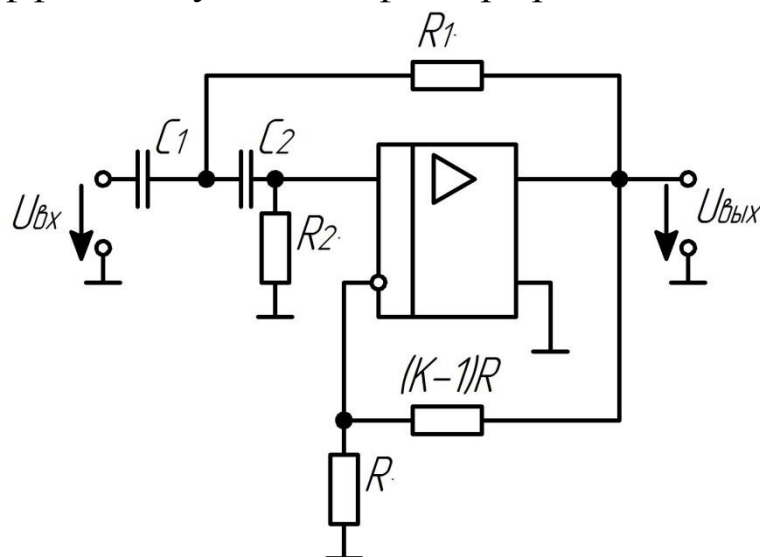


Рисунок 2.48 Активный фильтр верхних частот

## 2.4 Генераторы гармонических колебаний

### 2.4.1 Назначение, структурная схема и условие возбуждения

Генератором гармонических (синусоидальных) колебаний называют устройство, создающее переменное синусоидальное напряжение при отсутствии входных сигналов. Генератор преобразует энергию источника постоянного напряжения в энергию переменного входного сигнала.

Различают два режима возбуждения генератора: самовозбуждение (мягкий режим) и с внешним начальным сигналом (жесткий режим).

При мягком режиме сигнал на выходе автогенератора возникает после его подключения к источнику питания самопроизвольно.

При жестком режиме для возникновения колебаний требуется внешний начальный сигнал.

Мягкий режим возбуждения автогенератора можно объяснить с помощью графических построений (рисунок 2.49). Здесь изображены амплитудная характеристика собственно усилительного звена  $K$  (при использовании усилителей класса А) и прямая обратной связи  $\beta$ , характеризующая ослабляющее действие звена обратной связи.

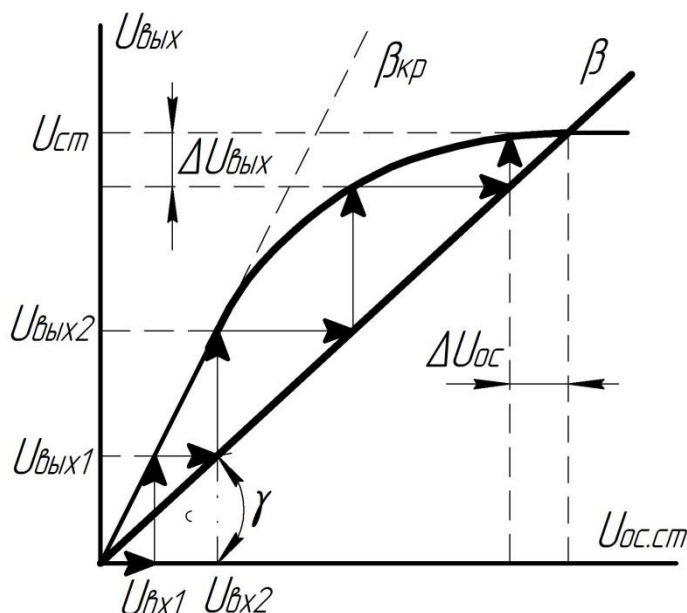


Рисунок 2.49 Мягкий режим самовозбуждения автогенератора

Несложный анализ графиков амплитудной характеристики и линии ОС позволяет пояснить возникновение, развитие и установление колебательного процесса в автогенераторе. Графически результат анализа показан стрелками на рисунке 2.49. Положим, что на вход усилителя воздействует небольшое входное напряжение  $U_{вх1}$ . Тогда после усиления в  $K$  раз на выходе генератора появится напряжение  $U_{вых1}$ . Это напряжение, ослабленное цепью положительной ОС в  $\beta$  раз, поступает на вход усилителя в виде напряжения  $U_{вх2}$ . Оно затем, в свою очередь, усилится до напряжения  $U_{вых}$ . Подобный процесс будет протекать до тех пор, пока амплитуда выходного колебания не достигнет стационарного значения, при котором выполняется условие баланса амплитуд. Стационарную амплитуду автоколебаний можно определить по координатам точки пересечения амплитудной характеристики усилителя с линией ОС (точка А на рисунок 2.49).

Нетрудно показать, что точка А является точкой устойчивого равновесия, и при случайном отклонении амплитуды выходного напряжения от стационарного значения  $U_{ст}$ , автогенератор всегда возвращается в исходное состояние. Следовательно, после подключения к схеме генератора напряжения питания автоколебания развиваются при воздействии на вход усилительного звена бесконечно малых импульсов, которые всегда имеются в напряжении шумов. Такой режим работы автогенератора называют мягким режимом самовозбуждения.

Обратимся к структурной схеме генератора с последовательной положительной обратной связью (ПОС) по напряжению (рисунок 2.50). Эта схема аналогична ранее изученной соответствующей структурной схеме усилителя с отрицательной обратной связью. Аналогичны и обозначения величин.

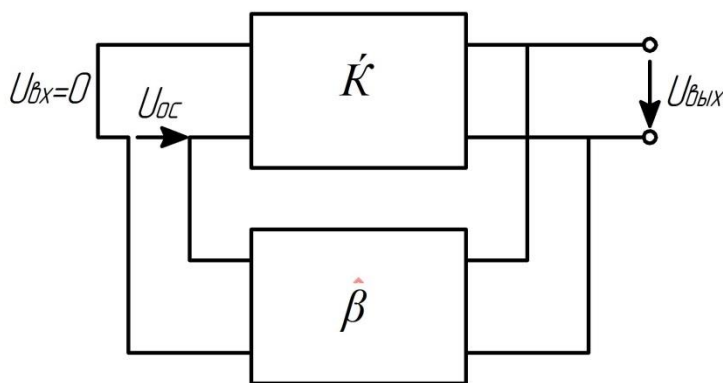


Рисунок 2.50 Схема генератора с положительной обратной связью

При наличии колебаний  $\dot{U}_{\text{вых}} = \dot{K} \cdot \dot{U}_{\text{ос}} = \dot{K} \cdot \dot{U}_{\text{вых}} \cdot \dot{\beta}$

откуда получаем условие самовозбуждения:  $\dot{K} \cdot \dot{\beta} = 1$

Запишем это условие в развернутом виде:

$$|\dot{K} \cdot \dot{\beta}| = 1;$$

$$\varphi + \psi = 2\pi n, n = 0, 1, \dots,$$

где  $\varphi$  — сдвиг по фазе для цепи прямой передачи (для усилителя);

$\psi$  — сдвиг по фазе для цепи обратной связи.

Выражение  $|K \cdot \beta| = 1$  называют условием баланса амплитуд, а выражение  $\varphi + \psi = 2\pi n$  — условием баланса фаз.

Если условие самовозбуждения  $K \cdot \beta = 1$  выполняется только для одной частоты, то на выходе генератора поддерживается синусоидальное напряжение этой частоты (именно это характерно для генераторов гармонических колебаний). Если это условие выполняется для нескольких частот, то выходное напряжение оказывается несинусоидальным, в нём имеется несколько гармоник.

Из изложенного следует, что генератор гармонических колебаний должен содержать по крайней мере одну частотно-избирательную цепь, которая бы обеспечивала выполнение условия самовозбуждения на заданной частоте. В зависимости от вида частотно-избирательной цепи, используемой в генераторе, генератор относят к тому или иному типу. В так называемых  $LC$ -генераторах используются  $LC$ - цепи. В  $RC$ -генераторах используются  $RC$ - цепи.

Основными функциональными элементами автогенератора являются:

активный элемент, выполненный в виде усилительного устройства для обеспечения баланса амплитуд,

фазосдвигающая цепь, обеспечивающая баланс фаз.

Простейший автогенератор гармонических колебаний может быть реализован на однокаскадном усилителе, снабженном цепью ПОС. Как известно, фаза выходного сигнала в транзисторном каскаде, выполненном по схеме включения с общим эмиттером, оказывается сдвинутой относительно входного на угол, равный  $\pi$ . В то же время баланс фаз требует сдвига фаз  $\psi = 2 \cdot \pi \cdot n$  ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ). Поэтому автогенератор на однокаскадном усилителе можно получить, если за счет внешней фазосдвигающей цепи обеспечить дополнительный сдвиг фазы выходного сигнала на угол, равный  $\pi$ .

Для реализации резистивно-емкостной связи в цепь ПОС можно включить RC-контур (Г-образную ячейку) (рисунок 2.51).

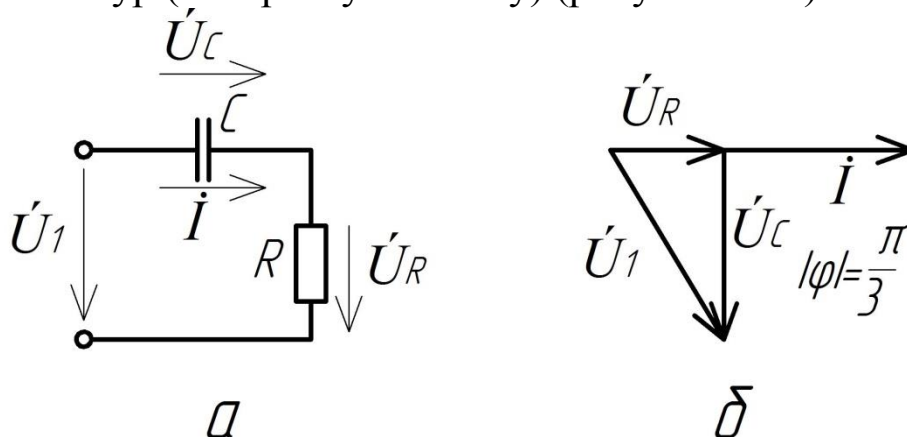


Рисунок 2.51 Резистивно-емкостная цепь: а – схема; б - векторная диаграмма

Для такой цепи фазовый сдвиг  $\Delta\varphi = \pi$  достигается только при  $\omega \rightarrow \infty$ . Поэтому для получения  $\Delta\varphi = \pi$  на некоторой, отличной от бесконечности, частоте необходимо каскадно включать как минимум две таких цепи. Полагая, например,  $\dot{U}_R = \dot{U}_2$  и выбирая значение  $X_C = 1 / \omega C = \sqrt{3}R$ , получаем сдвиг фаз (рисунок 2.51,б)

$$|\varphi| = \arctg X_C / R = \arctg \sqrt{3} = \pi / 3.$$

Поэтому для обеспечения требуемого  $\varphi = \pi$  используют, как показано на рисунке в, трехзвенную комбинацию Г-образных ячеек (рисунок 2.52).

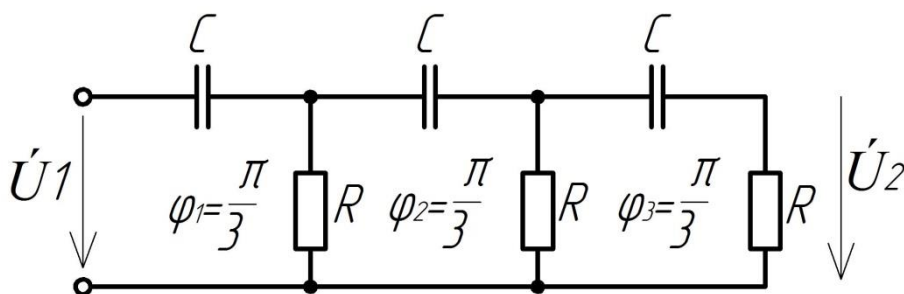


Рисунок 2.52 Схема трехзвенной цепи ПОС

#### 2.4.2 Генератор с фазосдвигающей цепью

На рисунке 2.53 показана функциональная схема генератора с фазосдвигающей цепью ОС.

Усилитель обеспечивает сдвиг фазы на  $180^\circ$ . В RC-цепях возникают заметные потери при передаче сигнала. Выходное напряжение

трехзвенной цепи ОС составляет только  $1/29 U_{\text{вх}}$ . Усилитель должен обеспечивать достаточное усиление для компенсации этих потерь. Если принять  $R_1 = R_2 = R_3$  и  $C_1 = C_2 = C_3$ , то при фазовом сдвиге  $180^\circ$  отношение напряжений

$$\frac{U_1}{U_2} = - \left( \frac{5}{\omega^2 R^2 C^2} - 1 \right).$$

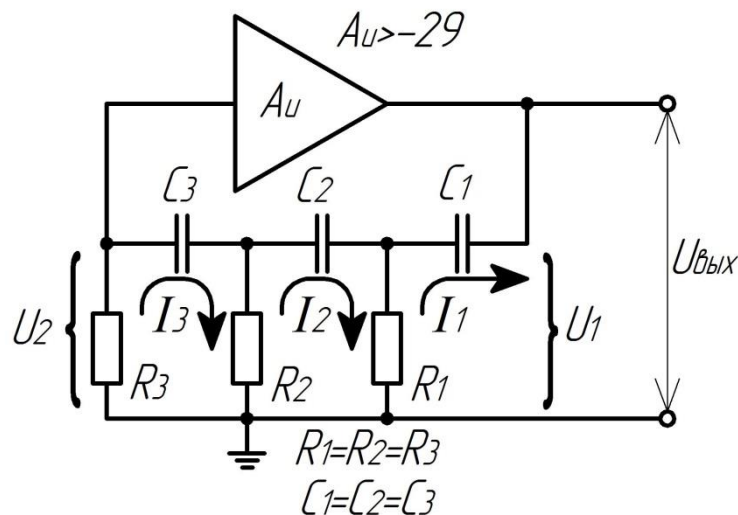


Рисунок 2.53 Генератор с фазосдвигающей цепью

Выражение для расчета генерируемой частоты имеет вид

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{6}RC}.$$

Другие возможности создания необходимого сдвига фазы связаны с использованием мостовых схем. К числу наиболее распространенных в генераторах мостовых схем относятся мост Вина и двойной Т-образный мост.

### 2.4.3 Генератор с мостом Вина

Одним из наиболее надежных генераторов  $RC$ -типа является генератор с мостом Вина (рисунок 2.54). Как и в схеме на рисунке 2.53,  $RC$ -цепь здесь используется в качестве частотно-избирательной цепи.

В генераторе с мостом Вина применяется или двухкаскадный, или операционный усилитель, обеспечивающий сдвиг фазы на  $360^\circ$ . На рабочей частоте  $f_0$  реактивная ветвь моста создает опережение по фазе и задержку напряжения. Когда напряжения  $U_2$  и  $U_4$  равны и сов-

падают по фазе на желаемой частоте, ПОС компенсирует ООС и возникает генерация. На любой другой частоте напряжение ПОС будет мало по сравнению с напряжением ООС  $U_4$  и генерация не возникает. На рисунке 2.54,б показаны соответствующие фазовые соотношения. ПОС максимальна на частоте  $f_0$ , когда сдвиг фазы равен нулю. Напряжения на  $R_3$  и  $R_4$  находятся в одной фазе, поэтому  $U_4$  всегда совпадает по фазе с  $U_1$ .

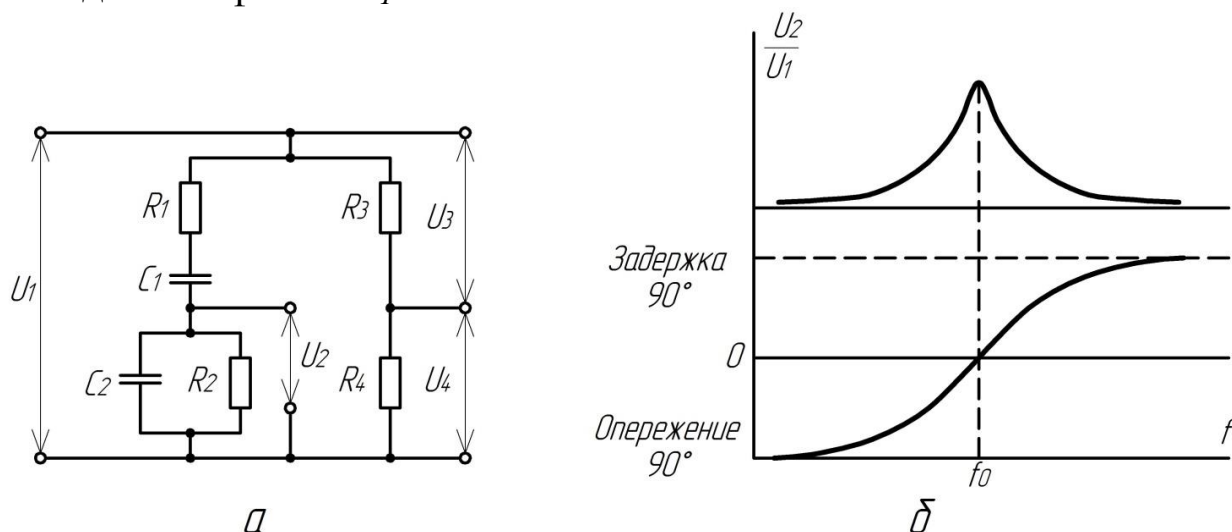
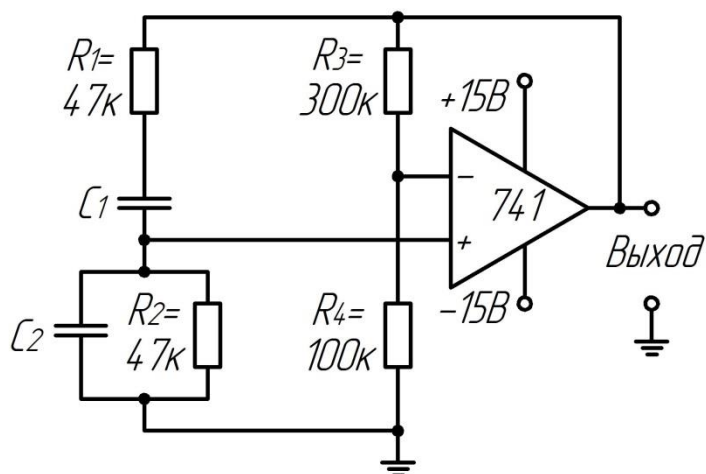


Рисунок 2.54 Мост Вина: а – схема моста; б - зависимости напряжения ПОС и сдвига фазы от частоты

На практике мост Вина используется совместно с ОУ или двухкаскадным усилителем. Резистивное плечо моста Вина действует как делитель напряжения в цепи ООС. Опорное напряжение  $U_4$  подключается к инвертирующему входу так, как показано на рисунке 2.55. ПОС создается фазосдвигающей цепочкой, и напряжение  $U_2$  подается на неинвертирующий вход.



### Рисунок 2.55 Схема генератора на ОУ с мостом Вина

Коэффициент усиления усилителя  $A_f$  при замкнутой цепи ОС должен быть немного больше трех, поскольку коэффициент передачи цепи ПОС  $\beta = 1/3$ . Это означает, что сопротивление  $R_3$  должно быть в 3 раза больше  $R_4$  (рисунок 2.54).

Необходимое деление сигнала ПОС определяется из условий  $R_1 = R_2$  и  $C_1 = C_2$ . Реактивное плечо моста образует делитель переменного напряжения.

Уравнение для расчета частоты генерируемых колебаний имеет вид

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

### 2.4.4 Генератор с двойным Т-образным мостом

На рисунке 2.56 приведены примеры схем двойного Т-образного моста и Т-образного фильтра.

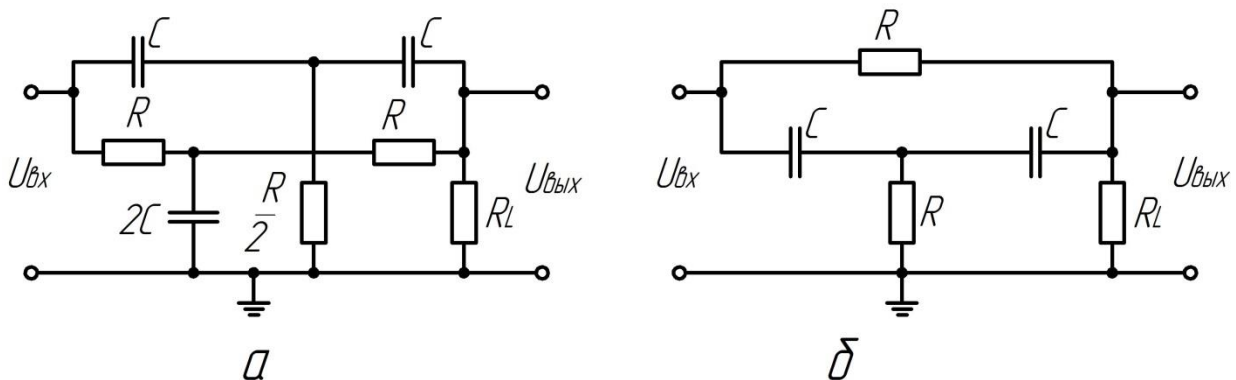


Рисунок 2.56 Схемы моста и фильтра: *а* - двойного Т-образного моста; *б* - Т-образного фильтра

Частоты вблизи  $f_0$  ослабляются или подавляются практически до нуля. "Щелевые" фильтры обычно комбинируются с широкополосными и узкополосными фильтрами. С соответствующими компонентами в этих приборах ослабление на частоте  $f_0$  может достигать 60 дБ (рисунок 2.57).

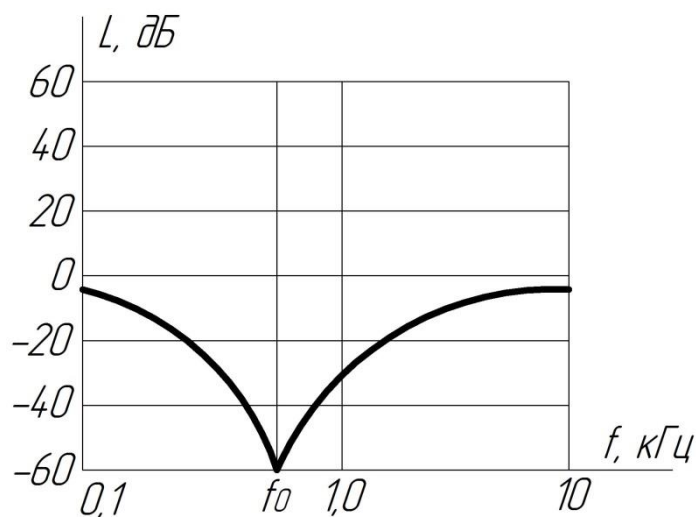


Рисунок 2.57 Частотная характеристика «щелевого» фильтра

Если двойной Т-образный мост использовать в цепи ООС совместно с ОУ, то коэффициент усиления усилителя на всех частотах окажется очень малым, за исключением частоты, избираемой фильтром. Поскольку ООС ослабляется благодаря высокому импедансу на частоте фильтра, коэффициент усиления усилителя очень высок. Это вызывает нестабильность усиления и приводит к возникновению генерации. Коэффициент усиления усилителя в схеме генератора с двойным Т-образным мостом устанавливается с помощью переменного сопротивления  $R_4$  (рисунок 2.58).

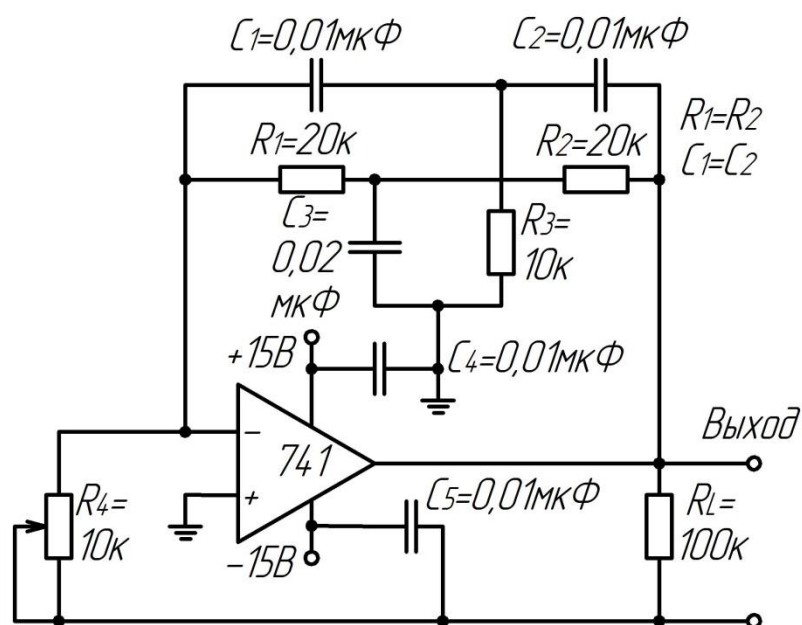


Рисунок 2.58 Схема генератора на ОУ с двойным Т-образным мостом

С помощью  $R_4$  устанавливается коэффициент усиления усилителя, достаточный для возникновения генерации. В дальнейшем  $R_4$  используется в качестве регулятора амплитуды колебаний. Стабилизацию частоты обеспечивают взаимно согласованные прецизионные компоненты.

Для генератора с двойным Т-образным мостом компоненты плеч моста определяются следующими соотношениями:

$$R_3 = R_1 / 2;$$

$$C_3 = 2C_1.$$

Выбор стандартных величин, кратных двум, может оказаться затруднительным. Поэтому часто используются переменные сопротивления.

Частота колебаний генератора

$$f_0 = \frac{1}{2\pi R_1 C_1}.$$

Это выражение совпадает с аналогичным выражением для генератора с мостом Вина, а также для генератора с Т-образным мостом.

### Вопросы для самоконтроля

- 1) Какое электронное устройство называется усилителем?
- 2) Перечислите параметры усилителя?
- 3) Что называется амплитудной характеристикой усилителя?
- 4) Что называется амплитудно-частотной характеристикой усилителя?
- 5) Назначение и виды обратных связей в усилителях.
- 6) Какой каскад называют повторителем напряжения и почему?
- 7) Какой каскад называют повторителем тока и почему?
- 8) Чем объясняется большая распространенность схемы ОЭ?
- 9) Какую из схем целесообразно применять в качестве согласующего узла, почему?
- 10) Какая из схем обладает наибольшим диапазоном рабочих частот?
- 11) Почему в схеме ОБ на базу транзистора подается отрицательное напряжение смещения?
- 12) Охарактеризуйте классы работы усилителей.

- 13) Как определяется коэффициент усиления многокаскадного усилителя?
- 14) Какова отличительная особенность каскада усиления мощности от других каскадов усилителя.
- 15) Перечислите основные параметры усилителя мощности.
- 16) Что такое дрейф нуля в усилителе постоянного тока и какие меры используются для борьбы с этим вредным явлением?
- 17) Что такое дифференциальный усилитель?
- 18) Что называется операционным усилителем ?
- 19) Какими основными параметрами характеризуется ОУ?
- 20) Что такое инвертирующий усилитель?
- 21) Какую особенность имеет неинвертирующий усилитель?
- 22) Как классифицируются электронные фильтры?
- 23) Какое устройство называется генератором синусоидальных колебаний?
- 24) Охарактеризуйте мягкий режим возбуждения генераторов синусоидальных колебаний?
- 25) Поясните условия самовозбуждения генераторов?
- 26) Что называется автогенератором?
- 27) Принцип работы генераторов с фазосдвигающей цепью?
- 28) Принцип работы генератора с мостом Вина?
- 29) Как определяется частота колебаний генератора с двойным Т – образным мостом?

### 3 ИСТОЧНИКИ ВТОРИЧНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

**Источники вторичного электропитания (ИВЭП) или вторичные источники питания (ВИП)** предназначены для получения напряжения, необходимого для непосредственного питания электронных и других устройств.

Предполагается, что вторичные источники в свою очередь получают энергию от первичных источников питания, вырабатывающих электричество — от генераторов, аккумуляторов и т. д. Питатель электронные устройства непосредственно от первичных источников обычно нельзя.

Вторичные источники питания являются одними из наиболее важных устройств электроники. Например, часто надежность того или иного устройства электроники существенно зависит от того, насколько надежен его вторичный источник питания. Общепринято вторичные источники называть источниками питания.

Основными ИВЭП являются;

- выпрямители;
- стабилизаторы напряжений;
- инверторы.

На рисунке 3.1 приведена структурная схема источника питания без преобразователя частоты.

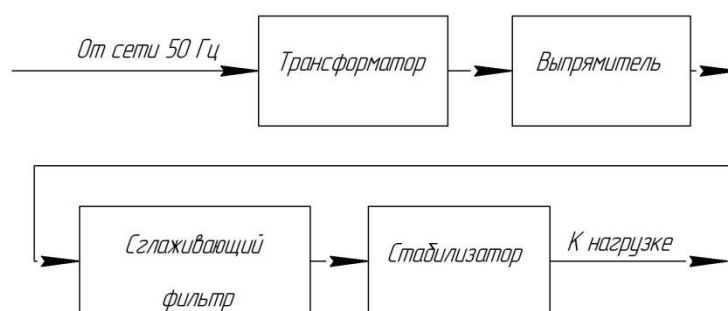


Рисунок 3.1 Структурная схема вторичного источника электропитания

Трансформатор предназначен для гальванической развязки питающей сети и нагрузки и изменения уровня переменного напряжения.

Выпрямитель преобразует переменное напряжение в напряжение одной полярности (пульсирующее).

Сглаживающий фильтр уменьшает пульсации напряжений на выходе выпрямителя.

Стабилизатор уменьшает изменения на нагрузке (стабилизирует напряжение), вызванные изменением напряжения сети и изменением тока, потребляемого нагрузкой. Напряжение в сети обычно может изменяться в диапазоне +15...-20 %.

### 3.1 Выпрямители

Выпрямителем называется устройство, предназначенное для преобразования переменного напряжения в напряжение одной полярности (пульсирующее). В маломощных источниках питания (до нескольких сотен ватт) обычно используют однофазные выпрямители. В мощных источниках целесообразно применять трехфазные выпрямители.

Выпрямители имеют следующие основные параметры: а) среднее значение выходного напряжения  $u_{\text{вых}}$

$$U_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T u_{\text{вых}} dt,$$

где  $T$  — период напряжения сети (для промышленной сети — 20 мс);

б) среднее значение выходного тока  $i_{\text{вых}}$

$$I_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T i_{\text{вых}} dt,$$

в) коэффициент пульсаций выходного напряжения

$$\varepsilon = \frac{U_m}{U_{\text{ср}}}$$

где  $U_m$  — амплитуда низшей (основной) гармоники выходного напряжения.

Часто коэффициент пульсаций измеряют в процентах.

Указанные параметры являются наиболее важными при использовании выпрямителя.

### 3.1.1 Однофазные выпрямители

**Однофазный однополупериодный выпрямитель** является простейшим и имеет схему, приведенную на рисунке 3.2,а. В таком выпрямителе ток через нагрузку протекает лишь в течение полупериода входного напряжения (рисунок 3.2,б).

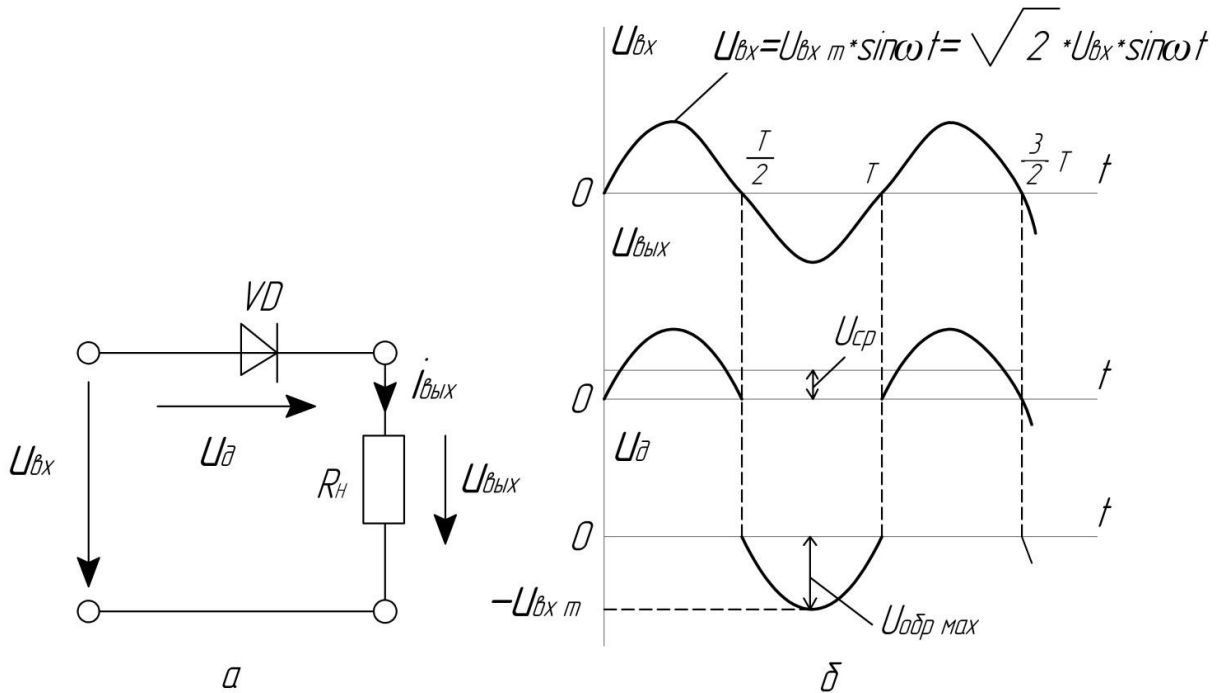


Рисунок 3.2 Однофазный однополупериодный выпрямитель:  
а - электрическая схема; б - диаграмма напряжений

Основные параметры однополупериодного выпрямителя:  
среднее значение выходного напряжения

$$U_{cp} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_{BX} \approx 0,45 \cdot U_{BX};$$

среднее значение тока на нагрузке выпрямителя

$$I_{cp} = \frac{U_{cp}}{R_H};$$

коэффициент пульсаций выходного напряжения

$$\varepsilon = \frac{\pi}{2} = 1,57,$$

максимальное обратное напряжение диода

$$U_{обр.макс} = \sqrt{2} \cdot U_{BX} = \frac{\pi}{2} \cdot U_{cp} \approx 1,57 \cdot U_{cp},$$

среднее значение тока через диод

$$I_{д.ср} = I_{ср},$$

максимальный ток диода

$$I_{д.макс} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{вх}}{R_H} = \pi \cdot I_{ср} \approx 3,14 \cdot I_{ср}.$$

Такой выпрямитель находит ограниченное применение в мало-мощных устройствах. Отрицательной чертой однополупериодного выпрямителя является протекание постоянной составляющей тока во входной цепи.

**Двухполупериодный выпрямитель со средней точкой** представляет собой параллельное соединение двух однополупериодных выпрямителей (рисунок 3.3,а). Диоды схемы проводят ток поочередно, каждый в течение полупериода (рисунок 3.3,б).

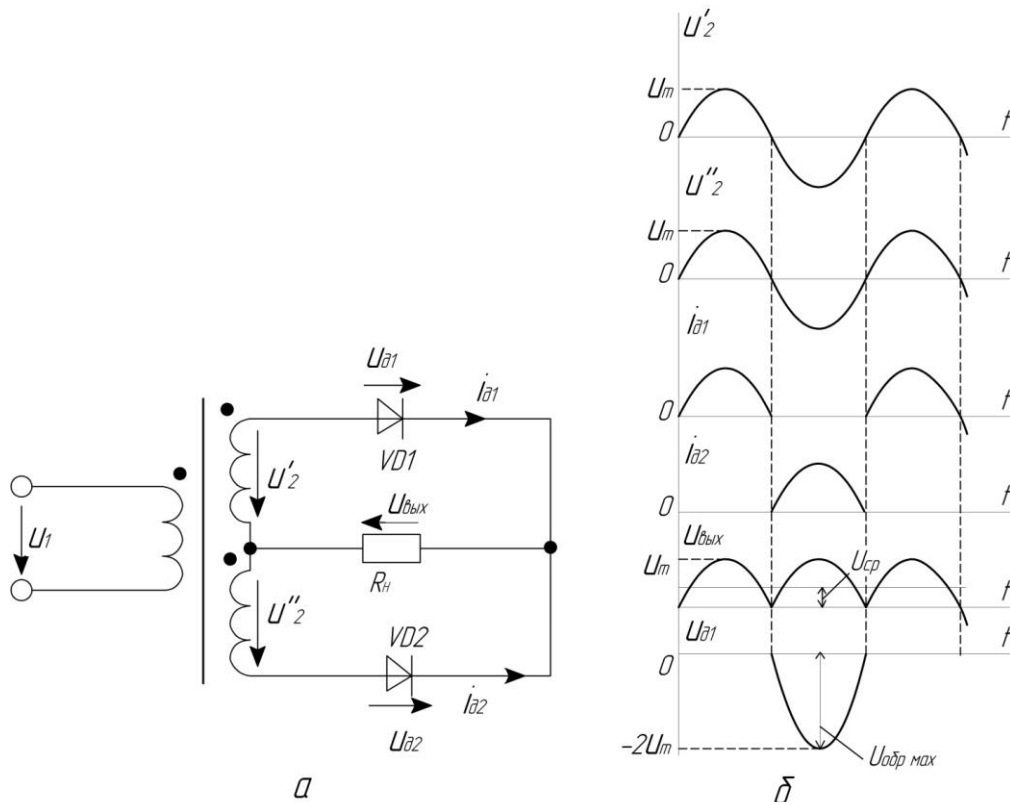


Рисунок 3.3 Двухполупериодный выпрямитель со средней точкой  
а - электрическая схема; б - временные диаграммы напряжений и токов

Основные параметры данного выпрямителя:  
среднее значение выходного напряжения

$$U_{cp} = 2 \cdot \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_2 \approx 0,9 \cdot U_2,$$

где  $U_2$  – действующее значение напряжения каждой половины вторичной обмотки;

среднее значение тока на нагрузке выпрямителя

$$I_{cp} = \frac{U_{cp}}{R_n};$$

коэффициент пульсаций выходного напряжения

$$\varepsilon = \frac{2}{3} \approx 0,67,$$

максимальное обратное напряжение диода

$$U_{обр.макс} = \sqrt{2} \cdot U_{вх} = \frac{\pi}{2} \cdot U_{cp} \approx 1,57 \cdot U_{cp},$$

среднее значение тока через диод

$$I_{д.ср} = \frac{1}{2} \cdot I_{cp},$$

максимальный ток диода

$$I_{д.макс} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{вх}}{R_n} = \frac{\pi}{2} \cdot I_{cp} \approx 1,57 \cdot I_{cp}$$

Двухполупериодный выпрямитель со средней точкой характеризуется довольно высокими технико-экономическими показателями и широко используется в технике. Недостатком рассматриваемого выпрямителя является необходимость двойного количества витков во вторичной обмотке трансформатора.

**Однофазный мостовой выпрямитель** (рисунок 3.4,а) можно считать пределом совершенства бестрансформаторных выпрямителей. Диоды в рассматриваемой схеме включаются и выключаются парами: одна пара – это диоды  $VD_1$  и  $VD_2$ , а другая –  $VD_3$  и  $VD_4$ . В течение одного полупериода открыты диоды  $VD_1$  и  $VD_2$ , и ток протекает по цепи: диод  $VD_1$ , нагрузка  $R_n$ , диод  $VD_2$ . В течение другого полупе-

риода ток протекает по цепи: диод  $VD_3$ , нагрузка  $R_H$ , диод  $VD_4$ . На нагрузке обеспечивается пульсирующий ток одного направления. Временные диаграммы напряжений и токов на входе и выходе выпрямителя представлены на рисунке 3.4,б.

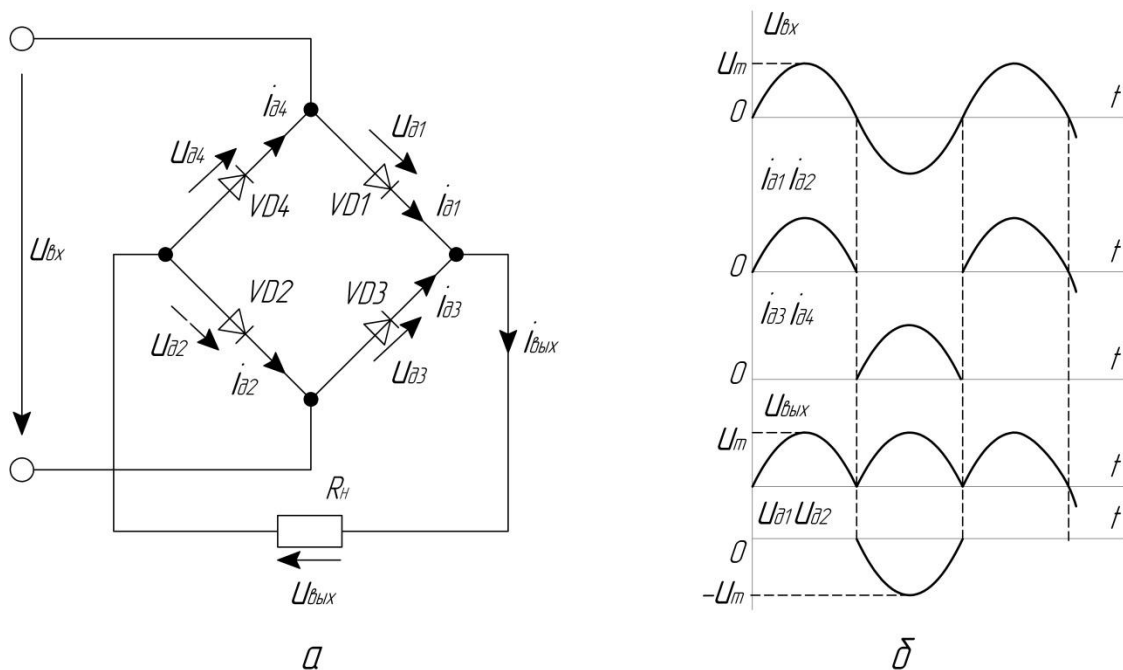


Рисунок 3.4 Однофазный мостовой выпрямитель:  
а - электрическая схема; б - временные диаграммы напряжений и токов

Основные параметры такого выпрямителя:

среднее значение выходного напряжения

$$U_{cp} = 2 \cdot \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_{\text{эс}} \approx 0,9 \cdot U_{\text{эс}} ;$$

среднее значение тока на нагрузке выпрямителя

$$I_{cp} = \frac{U_{cp}}{R_H} ;$$

коэффициент пульсаций выходного напряжения

$$\varepsilon = \frac{2}{3} \approx 0,67 ,$$

максимальное обратное напряжение диода

$$U_{\text{обр.макс}} = \sqrt{2} \cdot U_{\text{вх}} = \frac{\pi}{2} \cdot U_{cp} \approx 1,57,$$

среднее значение тока через диод

$$I_{\partial.cр} = \frac{1}{2} \cdot I_{cр},$$

максимальный ток диода

$$I_{д.макс} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{вх}}{R_H} = \frac{\pi}{2} \cdot I_{cр} \approx 1,57 \cdot I_{cр}.$$

Такой выпрямитель характеризуется высокими технико-экономическими показателями и широко используется на практике. Часто все четыре диода выпрямителя помещают в один корпус.

### 3.1.2 Трехфазные выпрямители

*Схема трехфазного выпрямителя с нулевым выводом и временные диаграммы его работы* приведены на рисунке 3.5.

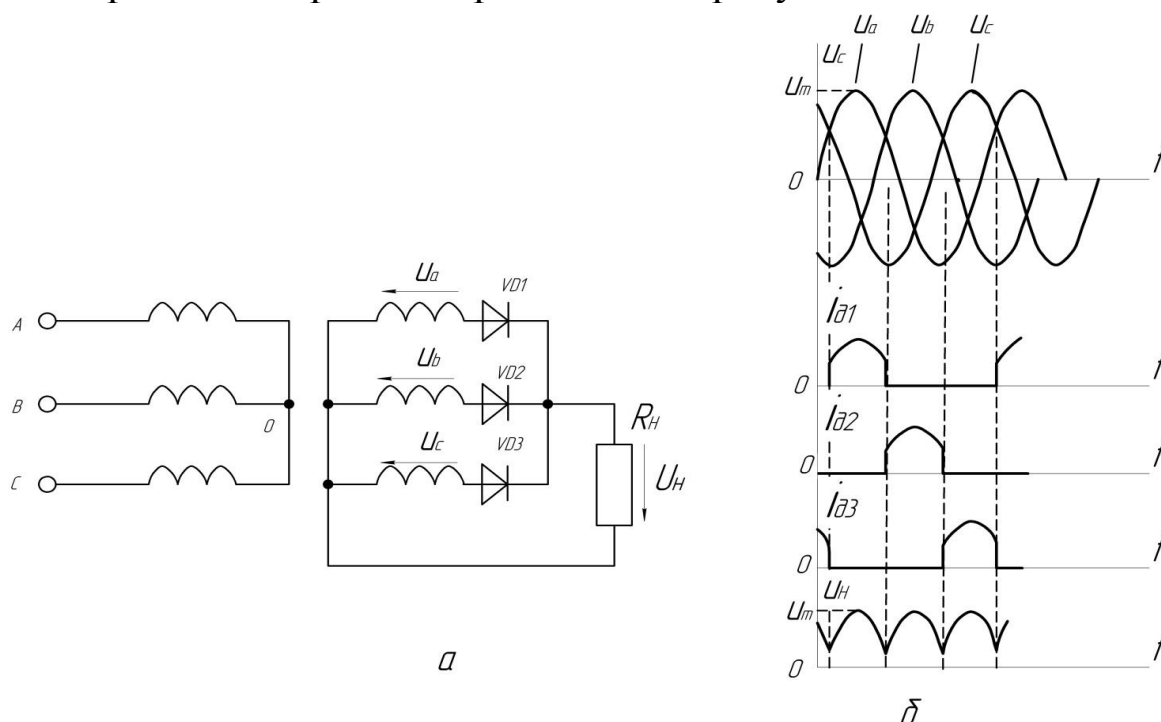


Рисунок 3.5 Трехфазный выпрямитель с нулевым выводом:  
а - электрическая схема; б - временные диаграммы напряжений и токов

В схеме используются три диода. Каждый из диодов открыт только в течение одной трети периода, когда мгновенное значение напряжения его фазы больше, чем напряжение двух остальных фаз генератора. В этом вы-

прямителе необходимо обязательно иметь нулевую точку трехфазной цепи.

Основные параметры трехфазного выпрямителя с нулевым выводом:

среднее значение выходного напряжения

$$U_{cp} = 1,17 \cdot U_2,$$

где  $U_2$  – действующее значение вторичной обмотки трансформатора;

среднее значение тока на нагрузке выпрямителя

$$I_{cp} = \frac{U_{cp}}{R_n},$$

коэффициент пульсаций выходного напряжения

$$\varepsilon = 0,25,$$

максимальное обратное напряжение диода

$$U_{обр.макс} = \frac{2\pi}{3} \cdot U_{cp} \approx 2,09 \cdot U_{cp},$$

среднее значение тока через диод

$$I_{д.ср} = \frac{1}{3} \cdot I_{cp},$$

максимальный ток диода

$$I_{д.макс} \approx 1,21 \cdot I_{cp}.$$

Коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения составляет 0,25, в то время как для двухполупериодного однофазного выпрямителя коэффициент пульсаций равен 0,67. Частота пульсаций в трехфазном выпрямителе в три раза выше частоты питающей сети.

**Схема трехфазного мостового выпрямителя (схема Ларионова)** приведена на рисунке 3.6.

Используемые в данной схеме 6 диодов выпрямляют как положительные, так и отрицательные полуволны трехфазного напряжения. Этот выпрямитель является аналогом однофазного мостового выпрямителя.

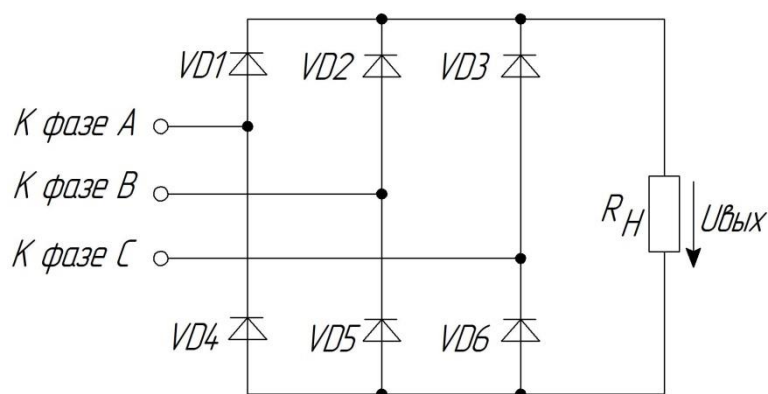


Рисунок 3.6 Схема трехфазного мостового выпрямителя

Основные параметры трехфазного мостового выпрямителя:  
среднее значение выходного напряжения

$$U_{cp} = 1,35 \cdot U_{2л},$$

где  $U_{2л}$  – действующее значение вторичного линейного напряжения;  
среднее значение тока на нагрузке выпрямителя

$$I_{cp} = \frac{U_{cp}}{R_n};$$

коэффициент пульсаций выходного напряжения

$$\varepsilon = 0,057 ,$$

максимальное обратное напряжение диода

$$U_{обр.макс} = \frac{2\pi}{3} \cdot U_{cp} = 1,045 \cdot U_{cp},$$

среднее значение тока через диод

$$I_{д.ср} = \frac{1}{3} \cdot I_{cp},$$

максимальный ток диода

$$I_{д.макс} \approx 1,045 \cdot I_{cp}.$$

Рассматриваемый выпрямитель обладает высокими технико-экономическими показателями и очень широко используется на практике. Коэффициент пульсаций очень мал ( $\varepsilon = 0,057$ ), а частота пульсаций в

шесть раз выше частоты сети. Всё это позволяет в некоторых случаях не использовать сетевой фильтр.

Основные формулы для расчета параметров рассмотренных выпрямителей сведены в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 Основные формулы для определения рабочих параметров выпрямителей

Схема выпрямителя	$U_{cp}$	$I_{cp}$	$U_{обр.макс}$	$I_{д. ср}$	$I_{д.макс}$
Однофазная одно- полупериодная	$0,45 \cdot U_{вх}$	$\frac{U_{cp}}{R_n}$	$\pi \cdot U_{cp}$	$I_{cp}$	$\pi \cdot I_{cp}$
Однофазная со средней точкой	$0,9 \cdot U_2$	$\frac{U_{cp}}{R_n}$	$\pi \cdot U_{cp}$	$\frac{I_{cp}}{2}$	$\frac{\pi}{2} \cdot I_{cp}$
Однофазная мостовая	$0,9 \cdot U_{вх}$	$\frac{U_{cp}}{R_n}$	$\frac{\pi}{2} \cdot U_{cp}$	$\frac{I_{cp}}{2}$	$\frac{\pi}{2} \cdot I_{cp}$
Трехфазная с нулевым выводом	$1,17 \cdot U_2$	$\frac{U_{cp}}{R_n}$	$2,09 \cdot U_{cp}$	$\frac{I_{cp}}{3}$	$1,21 \cdot I_{cp}$
Трехфазная мостовая	$1,35 \cdot U_{2л}$	$\frac{U_{cp}}{R_n}$	$1,045 \cdot U_{cp}$	$\frac{I_{cp}}{3}$	$1,045 \cdot I_{cp}$

Примечание: В таблице 1.1 приняты следующие обозначения:  $U_{cp}$  – среднее значение выпрямленного напряжения;  $I_{cp}$  – среднее значение выпрямленного тока;  $U_{обр.макс}$  – максимальное обратное напряжение диода;  $I_{д. ср}$  – среднее значение тока диода;  $I_{д.макс}$  – максимальное значение тока диода;  $U_{вх}$  – действующее значение напряжения на входе выпрямителя;  $R_n$  – сопротивление активной нагрузки;  $U_2$  – действующее значение напряжения вторичной обмотки трансформатора;  $U_{2л}$  – действующее значение вторичного линейного напряжения

### 3.1.3 Сглаживающие фильтры

Выпрямленное напряжение имеет существенные пульсации, поэтому широко используют сглаживающие фильтры.

Сглаживающие фильтры – устройства, уменьшающие пульсации выпрямленного напряжения. Важнейшим параметром сглаживающего фильтра является коэффициент сглаживания  $S$ , который определяется по следующей формуле:

$$S = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2},$$

где  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  — коэффициенты пульсаций на входе и выходе фильтра соответственно.

Для емкостного фильтра, у которого вход и выход фактически совпадают, под  $\varepsilon_1$  понимают коэффициент пульсаций до подключения фильтра, а под  $\varepsilon_2$  — коэффициент пульсаций после его подключения. Коэффициент сглаживания показывает, во сколько раз фильтр уменьшает пульсации. На выходе фильтра напряжение оказывается хорошо сглаженным, а коэффициент пульсаций может иметь значения в диапазоне 0,001...0,00003.

Простейшим фильтром является емкостной фильтр (С-фильтр). Рассмотрим его работу на примере однофазного однополупериодного выпрямителя (рисунке 3.7). Емкостной фильтр подключают параллельно нагрузке (рисунке 3.7,а). На отрезке времени  $t_1 \dots t_2$  диод открыт и конденсатор заряжается (рисунок 1.7,б).

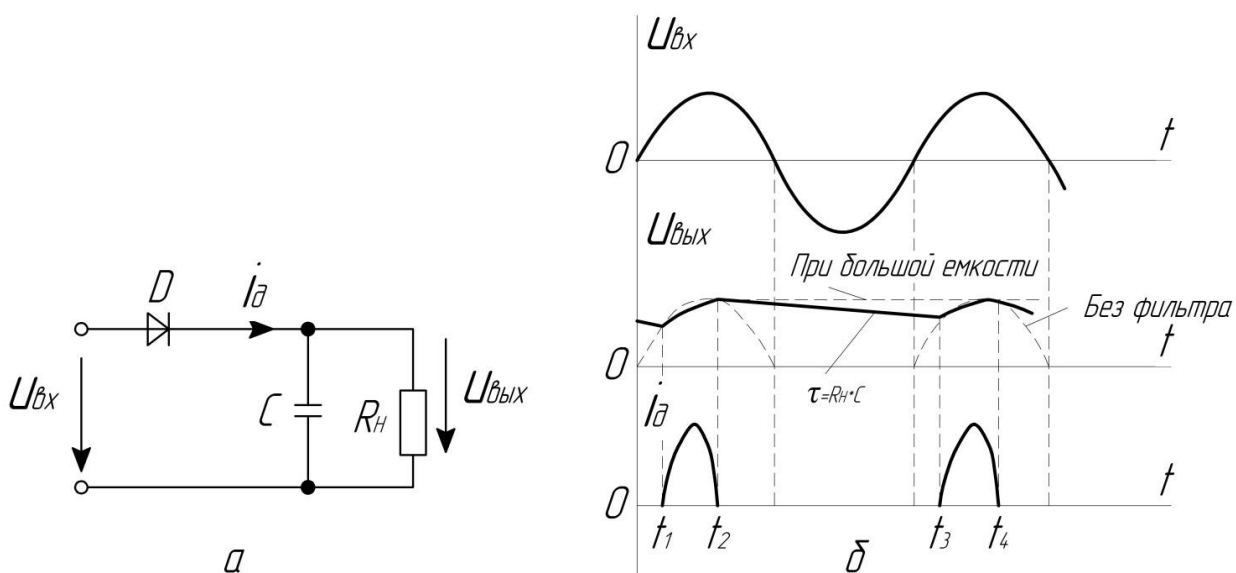


Рисунок 3.7 Однополупериодный выпрямитель с емкостным фильтром: а - схема; б - временные диаграммы его работы

На отрезке  $t_2 \dots t_3$  диод закрыт, источник входного напряжения отключен от конденсатора и нагрузки. Разряд конденсатора характеризуется экспонентой с постоянной времени  $\tau = R_H C$ . Ток через диод протекает только часть полупериода (отрезок  $t_1 \dots t_2$ ). Чем короче отрезок  $t_1 \dots t_2$ , тем больше амплитуда тока диода при заданном среднем токе нагрузки. Если емкость  $C$  очень велика, то отрезок  $t_1 \dots t_2$  оказывается очень малым, а амплитуда тока диода очень большой, и диод может выйти из строя. Такой фильтр широко используется в

маломощных выпрямителях; в мощных выпрямителях он используется редко, так как режим работы диода и соответствующих электрических цепей (к примеру, обмоток трансформатора) достаточно тяжел.

В качестве фильтра можно использовать и индуктивность. Легко доказать, что индуктивный фильтр ( $L$ -фильтр) практически не дает полезного эффекта в однофазном однополупериодном выпрямителе. Рассмотрим работу индуктивного фильтра на примере однофазного мостового выпрямителя. Индуктивный фильтр включают последовательно с нагрузкой (рисунок 3.8,а). Часто используют катушку индуктивности (реактор) на магнитном сердечнике с зазором.

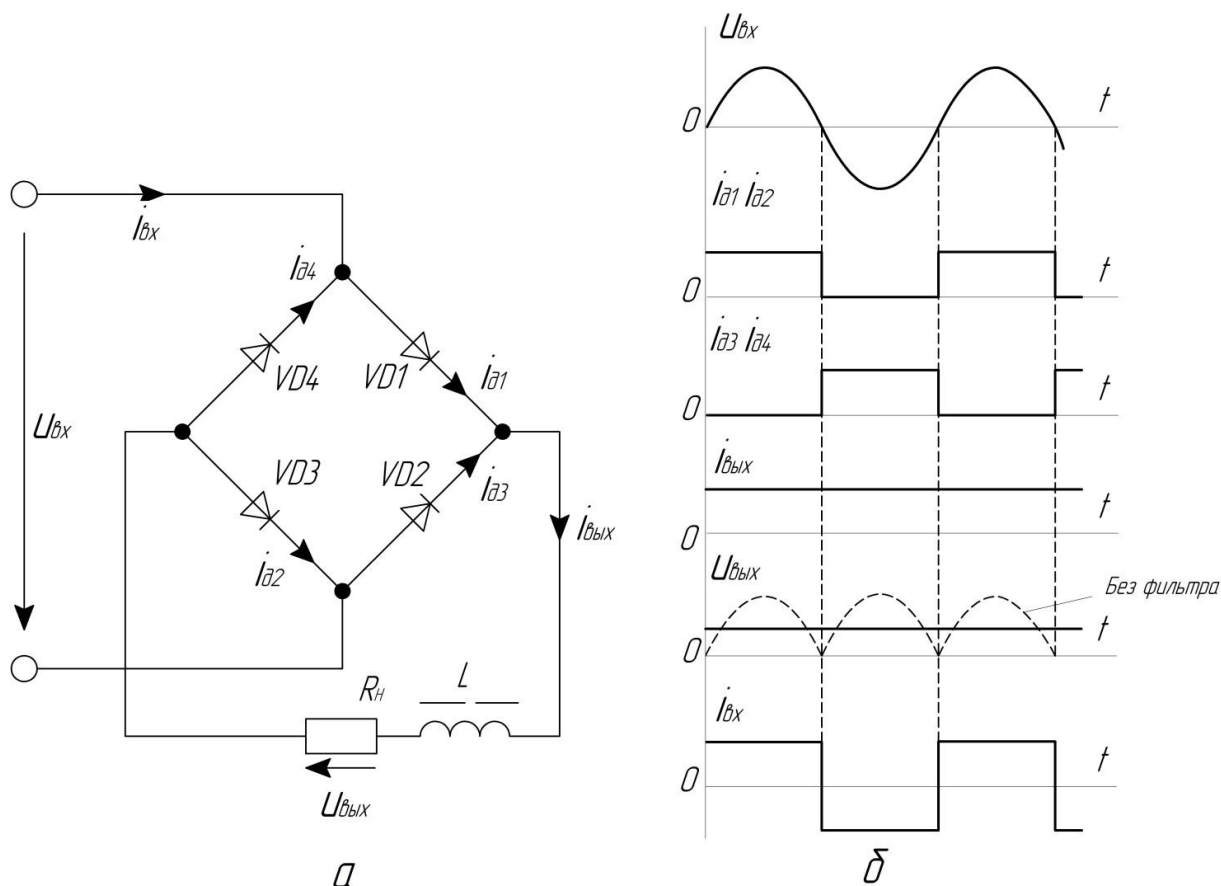


Рисунок 3.8 Мостовой выпрямитель с индуктивным фильтром: а – схема; б - временные диаграммы его работы

Предположим, что постоянная времени  $\tau$ , определяемая выражением  $\tau = \frac{L}{R_H}$ , достаточно велика (как это обычно бывает на практике). Тогда ток нагрузки оказывается практически постоянным (рисунок 1.8,б). Такой фильтр широко используется в выпрямителях, осо-

бенно мощных. Режим работы диодов (и соответствующих электрических цепей) не является тяжелым.

На практике используют также следующие типы фильтров (рисунок 3.9): индуктивно-емкостной или Г-образный  $LC$ -фильтр (а), Г-образный  $RC$ -фильтр (б), П-образный  $LC$ -фильтр (в), П-образный  $RC$ -фильтр (г).

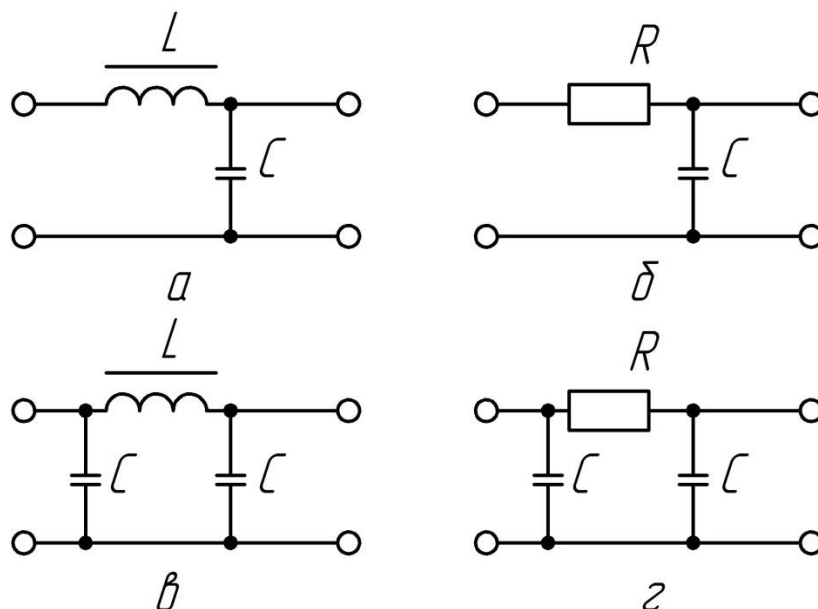


Рисунок 3.9 Типы сглаживающих фильтров:  
 а - Г-образный  $LC$ -фильтр; б - Г-образный  $RC$ -фильтр;  
 в - П-образный  $LC$ -фильтр; г - П-образный  $RC$ -фильтр

Обычно Г- и П-образные  $RC$ -фильтры применяются только в маломощных схемах, так как они потребляют значительную долю энергии. На практике применяют и другие, более сложные фильтры.

## 1.2 Стабилизаторы напряжения

Стабилизаторами напряжения называются устройства, автоматически обеспечивающие поддержание напряжения на нагрузке с заданной степенью точности.

Важнейшими параметрами стабилизатора напряжения являются коэффициент стабилизации  $K_{ст}$ , выходное сопротивление  $R_{вых}$  и коэффициент полезного действия  $\eta_{ст}$ .

Коэффициент стабилизации — это отношение относительного изменения напряжения на входе к соответствующему относительному изменению напряжения на выходе стабилизатора.

$$K_{\text{ст}} = \frac{\frac{\Delta u_{\text{вх}}}{u_{\text{вх}}}}{\frac{\Delta u_{\text{вых}}}{u_{\text{вых}}}},$$

где  $u_{\text{вх}}$ ,  $u_{\text{вых}}$  — постоянные напряжения соответственно на входе и выходе стабилизатора;

$\Delta u_{\text{вх}}$  — изменение напряжения  $u_{\text{вх}}$ ;

$\Delta u_{\text{вых}}$  — изменение напряжения  $u_{\text{вых}}$ , соответствующее изменению напряжения  $\Delta u_{\text{вх}}$ .

Чем больше коэффициент стабилизации, тем меньше изменяется выходное напряжение при изменении входного. У простейших стабилизаторов величина  $K_{\text{ст}}$  составляет единицы, а у более сложных — сотни и тысячи.

Выходное сопротивление стабилизатора определяется выражением

$$R_{\text{вых}} = \left| \frac{\Delta u_{\text{вых}}}{\Delta i_{\text{вых}}} \right|,$$

где  $\Delta u_{\text{вых}}$  — изменение постоянного напряжения на выходе стабилизатора;

$\Delta i_{\text{вых}}$  — изменение постоянного выходного тока стабилизатора, которое вызвало изменение выходного напряжения.

Выходное сопротивление стабилизатора является величиной, аналогичной выходному сопротивлению выпрямителя с фильтром. Чем меньше выходное сопротивление, тем меньше изменяется выходное напряжение при изменении тока нагрузки. У простейших стабилизаторов величина  $R_{\text{вых}}$  составляет единицы Ом, а у более совершенных — сотые и тысячные доли Ома. Необходимо отметить, что стабилизатор напряжения обычно резко уменьшает пульсации напряжения.

Коэффициент полезного действия стабилизатора  $\eta_{\text{ст}}$  — это отношение мощности, отдаваемой в нагрузку  $P_{\text{н}}$ , к мощности, потребляемой от входного источника напряжения  $P_{\text{вх}}$

$$\eta_{\text{ст}} = \frac{P_{\text{н}}}{P_{\text{вх}}}.$$

### 3.2.1 Параметрические стабилизаторы

**Параметрические стабилизаторы** — это устройства, в которых стабилизация напряжения осуществляется за счёт использования свойств

нелинейных элементов, специально предназначенных для этой цели. Чаще всего данными элементами являются стабилитроны. ВАХ стабилитрона такова, что падение напряжения в нём мало зависит от значения протекающего тока.

Схема параметрического стабилизатора на основе стабилитрона приведена на рисунке 3.10,а. Стабилитрон подключён к источнику постоянного тока нестабилизированного напряжения через гасящий резистор, который часто называют балластным сопротивлением  $R_{\delta}$ .

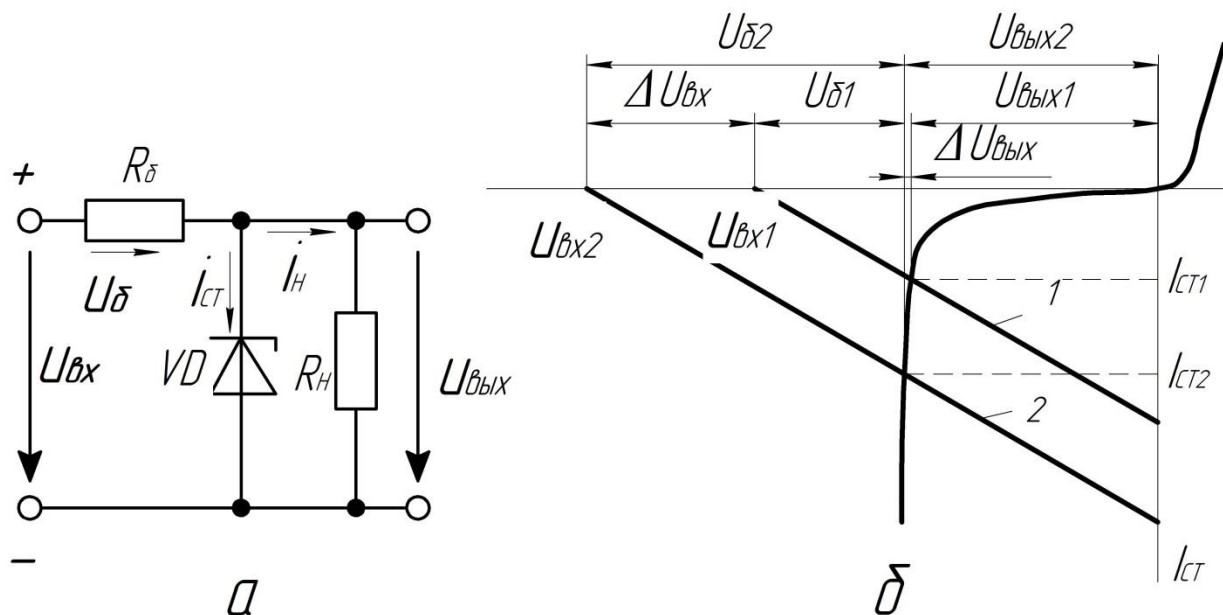


Рисунок 3.10 Параметрический стабилизатора на стабилитроне:  
а - электрическая схема; б – графическая интерпретация его работы

Проанализируем графически работу схемы, построив на вольт-амперной характеристике стабилитрона линии нагрузки для различных значений входного напряжения (рисунок 3.10,б).

Из графических построений очевидно, что при значительном изменении входного напряжения  $u_{вх}$  (на  $\Delta u_{вх}$ ), выходное напряжение изменяется на незначительную величину  $\Delta u_{вых}$ . Причем, чем меньше дифференциальное сопротивление стабилитрона (т. е. чем более горизонтально идет характеристика стабилитрона), тем меньше  $\Delta u_{вых}$ .

Благодаря особенностям ВАХ нелинейного стабилитрона (рисунок 3.10,б) на сопротивлении нагрузки  $R_{н}$  будет иметься напряжение, равное напряжению стабилизации  $U_{ст}$ .

$$U_{вых} = U_{вх} - U_{\delta}.$$

При изменении напряжения питания на величину  $\Delta U_{\text{вх}}$  увеличивается ток через гасящее сопротивление  $R_{\text{б}}$  и падение напряжения на нем ( $U_{\text{б}} + \Delta U_{\text{б}}$ ). При этом падение напряжения на сопротивлении нагрузки остается практически неизменным

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} - U_{\text{б}} + \Delta U_{\text{вх}} - \Delta U_{\text{б}}.$$

Отсюда следует, что  $\Delta U_{\text{вх}} \approx \Delta U_{\text{б}}$ .

Другими словами приращение входного напряжения компенсируется соответствующим приращением падения напряжения на гасящем сопротивлении. В итоге падение напряжения на нагрузке остается практически постоянным.

Величину резистора  $R_{\text{б}}$  выбирают из условия

$$R_{\text{б}} = \frac{U_{\text{вх}} - U_{\text{вых}}}{I_{\text{н}} + I_{\text{ст.ном}}}$$

где  $I_{\text{ст.ном}} = \frac{I_{\text{ст.мах}} + I_{\text{ст.мин}}}{2}$  — номинальный ток,

$I_{\text{ст.мах}}$ ,  $I_{\text{ст.мин}}$  — максимальные и минимальные токи стабилитрона в режиме стабилизации.

Выходное сопротивление параметрического стабилизатора определяется дифференциальным сопротивлением стабилитрона,

$$R_{\text{вых}} = R_{\text{д}} \parallel R_{\text{б}} \approx R_{\text{д}}.$$

Коэффициент стабилизации можно определить, полагая при  $R_{\text{д}} \ll R_{\text{н}}$  и  $R_{\text{б}} \gg R_{\text{д}}$ , что  $\Delta U_{\text{н}} = \Delta I_{\text{ст}} R_{\text{д}}$  и  $\Delta U_{\text{вх}} = \Delta I_{\text{ст}} (R_{\text{д}} + R_{\text{б}}) \approx \Delta I_{\text{ст}} R_{\text{б}}$ .

Тогда

$$K_{\text{ст}} = \frac{\Delta I_{\text{вх}}}{I_{\text{вх}}} \cdot \frac{I_{\text{н}}}{\Delta I_{\text{н}}} = \frac{\Delta I_{\text{ст}} R_{\text{б}}}{U_{\text{вх}}} \cdot \frac{U_{\text{н}}}{\Delta I_{\text{ст}} R_{\text{д}}} = \frac{U_{\text{н}}}{U_{\text{вх}}} \cdot \frac{R_{\text{б}}}{R_{\text{д}}}.$$

Обычно  $K_{\text{ст}}$  для параметрического стабилизатора не превышает  $20 \div 50$ .

Параметрические стабилизаторы используют для нагрузок от нескольких единиц до десятков миллиампер. Наиболее часто они применяются как источники опорного напряжения в компенсационных стабилизаторах напряжения.

### 3.2.1 Компенсационные стабилизаторы напряжения

**Компенсационные стабилизаторы** представляют собой замкнутые системы автоматического регулирования. Характерными элемен-

тами компенсационного стабилизатора являются источник опорного (эталонного) напряжения (ИОН), сравнивающий и усиливающий элемент (СУЭ) и регулирующий элемент (РЭ). В качестве ИОН обычно используют ту или иную электронную цепь на основе стабилитрона, в качестве СУЭ часто используют операционный усилитель, а в качестве РЭ — биполярный или полевой транзистор.

На рисунке 3.11,а приведена структурная схема непрерывного компенсационного стабилизатора напряжения с последовательным включением регулирующего элемента, а на рисунке 3.11,б — с параллельным включением регулирующего элемента.

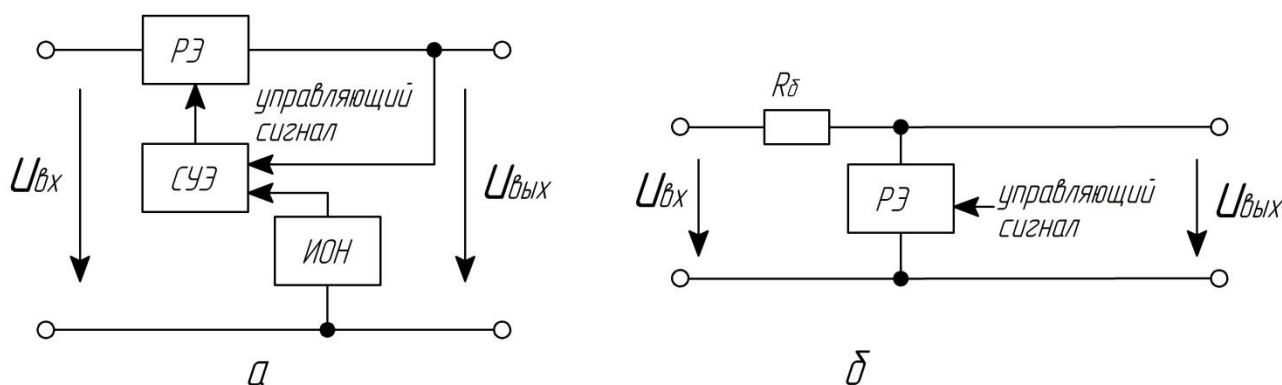


Рисунок 3.11 Структурная схема компенсационного стабилизатора напряжения: а - с последовательным включением РЭ; б - параллельным включением РЭ

Чаще всего регулирующий элемент включают последовательно с нагрузкой. В этом случае стабилизатор называют последовательным (рисунок 3.11,а). Иногда регулирующий элемент включают параллельно нагрузке, и тогда стабилизатор называют параллельным (рисунок 3.11, б, здесь СУЭ и ИОН с целью упрощения не показаны). В параллельном стабилизаторе используется балластное сопротивление  $R_{\text{б}}$ , включаемое последовательно с нагрузкой.

Принцип работы компенсационного стабилизатора заключается в следующем. Напряжение на выходе стабилизатора или некоторая часть этого напряжения постоянно сравнивается с эталонным напряжением, вырабатываемым ИОН. В зависимости от их соотношения сравнивающим и усиливающим элементом вырабатывается управляющий сигнал для регулирующего элемента, изменяющий его режим работы таким образом, чтобы напряжение на выходе стабилизатора оставалось практически постоянным.

В зависимости от режима работы регулирующего элемента стабилизаторы разделяют на непрерывные и импульсные (ключевые, релейные). В непрерывных стабилизаторах регулирующий элемент (транзистор) работает в активном режиме, а в импульсных - в импульсном.

Рассмотрим принципиальную схему непрерывного стабилизатора (рисунок 3.12). Эта схема соответствует приведенной выше структурной схеме последовательного стабилизатора.

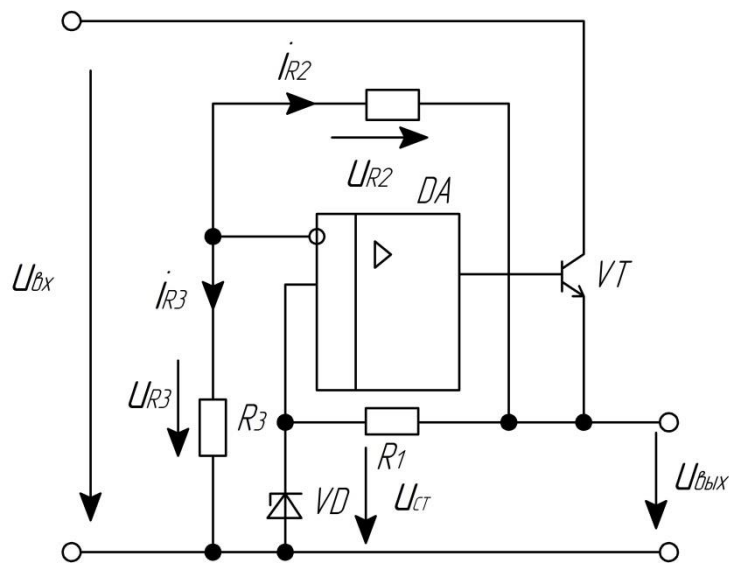


Рисунок 3.12 Принципиальная схема непрерывного стабилизатора

Из схемы очевидно, что на элементах  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $DA$  и  $VT$  построен неинвертирующий усилитель на основе ОУ с выходным каскадом в виде эмиттерного повторителя на транзисторе  $VT$ , а входным напряжением для него является выходное напряжение параметрического стабилизатора на элементах  $R_1$  и  $VD$ .

Выходное напряжение стабилизатора равно разности его входного напряжения и падения напряжения между выводами эмиттера и коллектора регулирующего транзистора  $VT$ :

$$U_{вых} = U_{вх} - U_{КЭ}.$$

В свою очередь, для  $U_{КЭ}$  справедливо выражение

$$U_{КЭ} = U_{КБ} + U_{БЭ} \approx U_{КБ} + const.$$

Напряжение  $U_{КБ}$  определяется падением напряжения на резисторе смещения

$$R_{CM} (U_{КБ} = I_R R_{CM} = U_{вх} - U_{DA_{вых}}).$$

Операционный усилитель DA включен по схеме усилителя с дифференциальным входом и поэтому его выходное напряжение равно

$$U_{DA \text{ вых}} = K_{UO}(U_{эм} - U_{R2}).$$

Так как цепь ООС в усилителе отсутствует, то из-за большого  $K_{UO}$  можно считать, что во всех режимах работы  $U_{эм} - U_{R2} = 0$ , и, следовательно, выходное напряжение, стабилизатора

$$U_{вых} = U_{эм} \cdot (R_1 + R_2)/R_2.$$

Возникновение любых отклонений выходного напряжения от указанного уровня приводит к нарушению условия  $U_{эм} - U_{R2} = 0$ . Это изменяет выходное напряжение операционного усилителя, а следовательно, и напряжение  $U_{КБ}$  транзистора VT, компенсируя возникшие отклонения.

Допустим, выходное напряжение стабилизатора увеличилось. Тогда  $U_{R2} > U_{он}$ , что приводит к уменьшению напряжения  $U_{DA \text{ вых}}$  и соответствующему увеличению  $U_{Rсм}$  и  $U_{кэ}$  транзистора VT, что компенсирует возникшие отклонения. При уменьшении  $U_{вых}$  увеличивается  $U_{DA \text{ вых}}$ , уменьшается  $U_{Rсм}$  и  $U_{кэ}$  и выходное напряжение восстанавливается.

Основным недостатком стабилизаторов с непрерывным регулированием является невысокий КПД, поскольку значительный расход мощности имеет место в регулирующем элементе, так как через него проходит весь ток нагрузки, а падение напряжения на нем равно разности между входным и выходным напряжениями стабилизатора.

### Вопросы для самоконтроля

- 1) Какие устройства называются источниками вторичного электропитания и какова их роль в электрических схемах?
- 2) Что называется выпрямителем?
- 3) Классификация выпрямителей.
- 4) Принцип работы однополупериодного выпрямителя?
- 5) Что называется коэффициентом пульсаций выпрямителя?
- 6) Достоинства и недостатки двухполупериодного мостового выпрямителя?
- 7) Где применяются выпрямители?
- 8) Назначение сглаживающих фильтров?
- 9) Что называется коэффициентом сглаживания фильтра?

- 10) Перечислите виды сглаживающих фильтров?
- 11) Какое электронное устройство называется стабилизатором напряжения?
- 12) Что называется коэффициентом стабилизации стабилизатора напряжения?
- 13) Какие стабилизаторы напряжения называются параметрическими?
- 14) Перечислите достоинства и недостатки параметрического стабилизатора напряжения?
- 15) Какие стабилизаторы напряжения называются компенсационными?
- 16) Назовите элементы компенсационного стабилизатора напряжения?
- 17) Перечислите достоинства и недостатки компенсационного стабилизатора напряжения?

## 4 ИМПУЛЬСНЫЕ УСТРОЙСТВА

**Импульсными** называются электронные устройства, работа которых основана на использовании импульсных (дискретных) сигналов.

Импульсные устройства имеют следующие преимущества по сравнению с аналоговыми:

- имеют повышенную помехоустойчивость, так как и при высоком уровне помех, обычно не возникает проблемы отличить одно состояние схемы от другого, а именно состояние схемы определяет информацию о преобразуемом сигнале;
- обладают большим КПД (за счет отсутствия потребления энергии между импульсами);
- на их работе меньше сказывается разброс параметров, применяемых приборов, так как транзисторы работают в ключевом режиме;
- имеют простую конструкцию, т.к. при их реализации используется ограниченный набор одностипных приборов.

На импульсных методах основана работа большинства автоматических и телемеханических устройств.

### 4.1 Параметры импульсного сигнала

**Основные термины.** Обратимся для примера к идеализированному импульсу, который называют трапецеидальным (рисунок 4.1а).

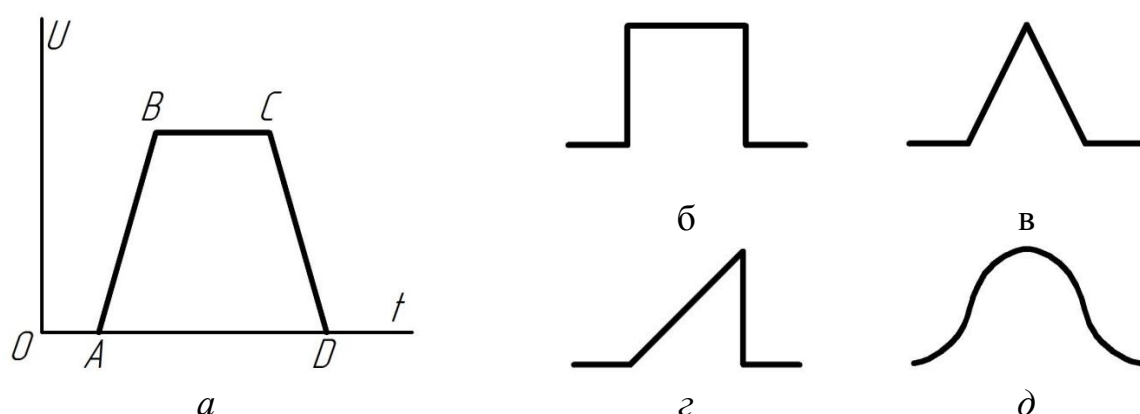


Рисунок 4.1 Виды идеализированных импульсов:

*а* – трапецеидальный; *б* – прямоугольный; *в* – треугольный;  
*г* - пилообразный; *д* - колоколообразный

Участок трапецеидального импульса  $AB$  называют фронтом, участок  $BC$  – вершиной, участок  $CD$  – срезом, отрезок  $AD$  – основа-

нием. Иногда участок АВ называют передним фронтом, а участок CD – задним фронтом.

На рисунке 4.1,б приведены другие идеализированные импульсы характерных форм и даны их названия.

Более сложный по форме, приближенный к реальному, вид импульса показан на рисунке 4.2, а.

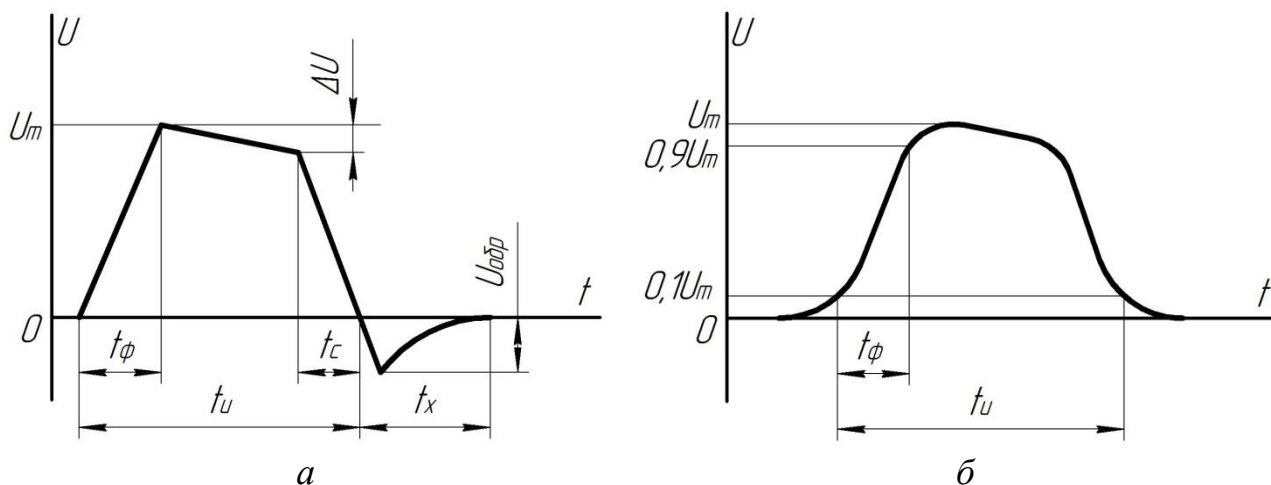


Рисунок 4.2 Характерные параметры импульса:  
а - идеализированного; б - реального

Участок импульса, соответствующий отрицательному напряжению, называют хвостом импульса, или обратным выбросом.

Для величин, указанных на рисунке 4.2 обычно используют следующие названия:  $t_u$  – длительность импульса;  $t_\phi$  – длительность фронта импульса;  $t_c$  – длительность среза импульса;  $t_x$  – длительность хвоста импульса;  $U_m$  – амплитуда (высота) импульса;  $\Delta U$  – спад вершины импульса;  $U_{обр}$  – амплитуда обратного выброса.

При определении параметров реальных импульсов обычно нет возможности однозначно разделить импульс на характерные участки, поэтому в этих случаях параметры импульсов определяют исходя из тех или иных допущений. Например, длительность импульса и фронта импульса часто определяют так, как показано на рисунке 4.2,б.

Обратимся к периодически повторяющимся импульсам (рисунок 4.3).

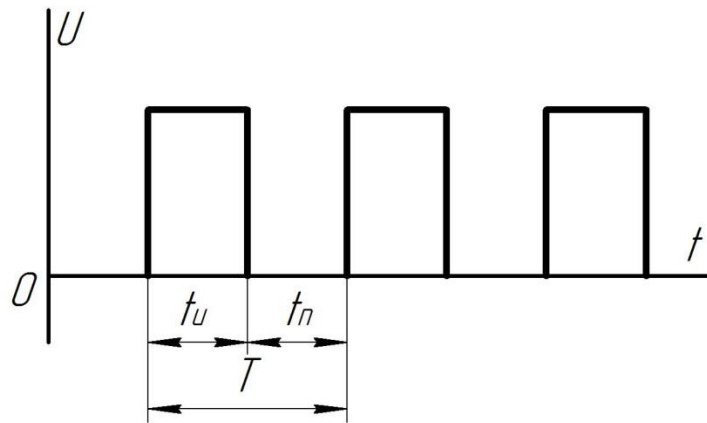


Рисунок 4.3 Периодически повторяющиеся импульсы

В этом случае используют следующие параметры:

$T$  – период повторения импульсов;

$f=1/T$  – частота повторения импульсов;

$t_u$  – длительность импульса;

$t_n$  – длительность паузы;

$Q=T/t_u$  – скважность импульса;

$K_z=1/Q=t_u/T$  – коэффициент заполнения.

## 4.2 Простейшие формирователи импульсных сигналов и триггер Шмитта

К формирователям импульсов относят достаточно широкий круг различных устройств, предназначенных для преобразования входных сигналов с целью получения импульсов с требуемыми временными и амплитудными параметрами. К таким устройствам относят устройства увеличения крутизны переднего и заднего фронтов импульса, устройства задержки, «укорачивания» и «расширения» импульсов и ряд других устройств.

Простейшими формирователями импульсов могут служить  $RL$ - и  $RC$ -цепи (рисунок 4.4,*а* и рисунок 4.5,*а*). При приложении к входу  $RC$  – цепи прямоугольного импульса (рисунок 4.4,*б* и рисунок 4.5,*б*) имеют место переходные процессы изменения накопленной или накапливаемой энергии. Форма выходного напряжения  $u_{вых}$  на элементах  $R$  и  $C$  цепи зависит как от постоянной времени  $\tau = RC$  цепи (рисунок 4.4, *в*, *г* и рисунок 4.5, *в*, *г*), так и от длительности  $t_u$  импульса.

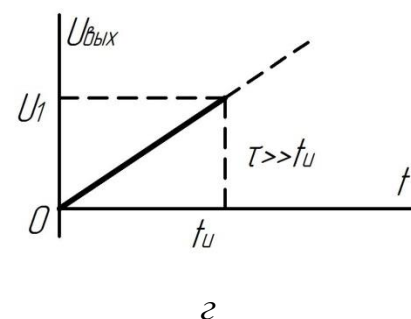
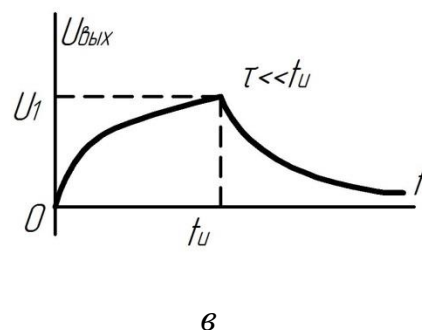
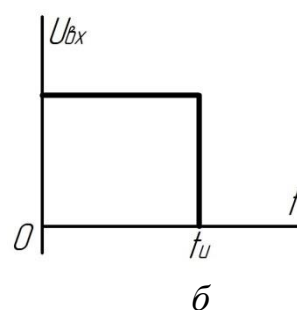
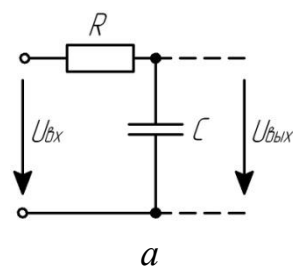
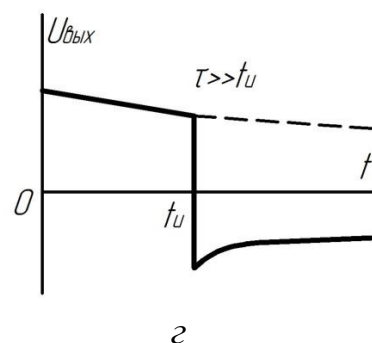
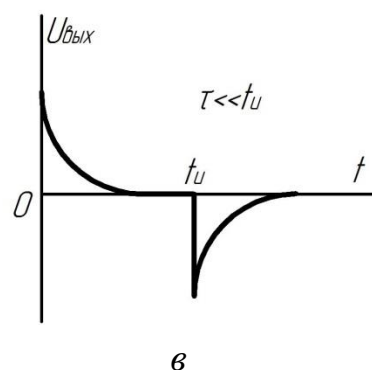
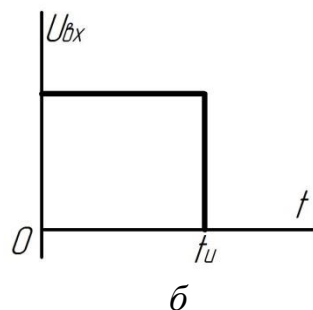
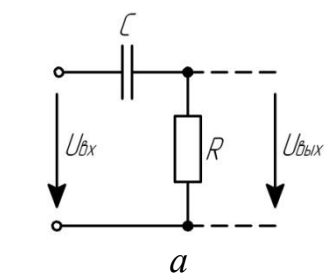


Рисунок 4.4 Формирование импульсов:  
а - RC –цепь; б - прямоугольный импульс; в - выходной сигнал при  $\tau \ll t_u$ ; г - выходной сигнал при  $\tau \gg t_u$

Рисунок 4.5 Формирование импульсов:  
а - RC –цепь; б - прямоугольный импульс; в - выходной сигнал при  $\tau \ll t_u$ ; г - выходной сигнал при  $\tau \gg t_u$

При малом значении постоянной времени  $\tau \ll t_u$  (рисунок 2.5, в) цепи выходной сигнал приближается к прямоугольной форме, а при  $\tau \gg t_u$  (рисунок 4.5, г) получают практически линейно нарастающее напряжение  $u_{\text{вых}} = Ut/\tau$  в интервале от 0 до  $t_u$ . По окончании времени импульса напряжение медленно спадает до нуля по закону экспоненты:

$$u_{\text{вых}} = Ue^{-\frac{t}{\tau}} (\tau > t).$$

Триггер Шмитта — это устройство, передаточная характеристика которого имеет вид, приведенный на рисунке 4.6.

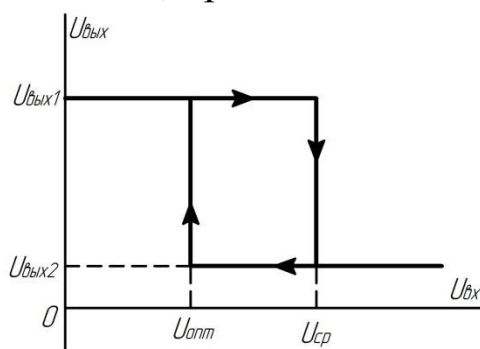


Рисунок 4.6 Передаточная характеристика триггера Шмитта

Из характеристики следует, что она имеет значительный гистерезис, обуславливающий ряд положительных свойств триггера Шмитта.

При подаче на вход триггера Шмитта входного сигнала, как только он превышает уровень срабатывания  $U_{ср}$  (рисунок 4.7, а), на выходе устанавливается низкое выходное напряжение (рисунок 4.7, б), и при уменьшении входного напряжения ниже порога отпущения  $U_{онм}$  на выходе устанавливается высокое выходное напряжение.

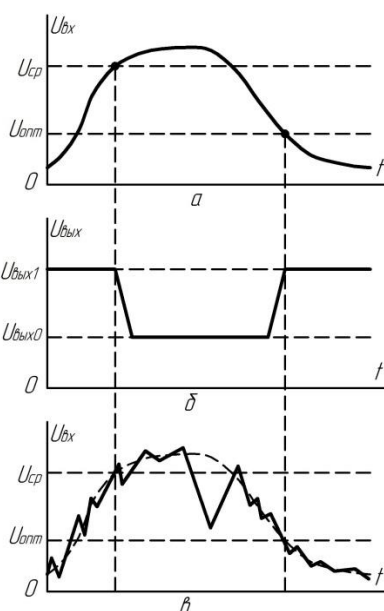


Рисунок 4.7 Формы сигналов триггера Шмитта:  
а — входного; б — выходного; в — восстановленного

Выходной сигнал триггера Шмитта имеет крутые фронты, длительность которых не зависит от скорости нарастания или спада входного сигнала. Именно это обстоятельство позволяет использовать триггеры Шмитта для восстановления формы импульсных сигналов, искаженных в результате прохождения по линиям связи, в следствии чего их фронты становятся более пологими и искажается форма сигнала. Использование же триггера Шмитта позволяет восстановить исходную форму сигнала.

Кроме того, благодаря наличию гистерезиса в передаточной характеристике триггера Шмитта, устраняется влияние помех и шумов при условии, что их амплитуда меньше разности ( $U_{cp} - U_{omn}$ ) (рисунок 4.7, в).

### 4.3 Электронные ключи

Импульсная техника базируется на использовании электронных ключей. Электронным ключом называется устройство, предназначенное для формирования импульсных сигналов.

Через идеальный разомкнутый ключ ток не протекает, а в замкнутом состоянии падение напряжения на нем равно нулю. В качестве электронных ключей чаще всего применяют транзисторный каскад с ОЭ. Его схема показана на рисунке 4.8, а, нагрузочная диаграмма — на рисунке 4.8, б.

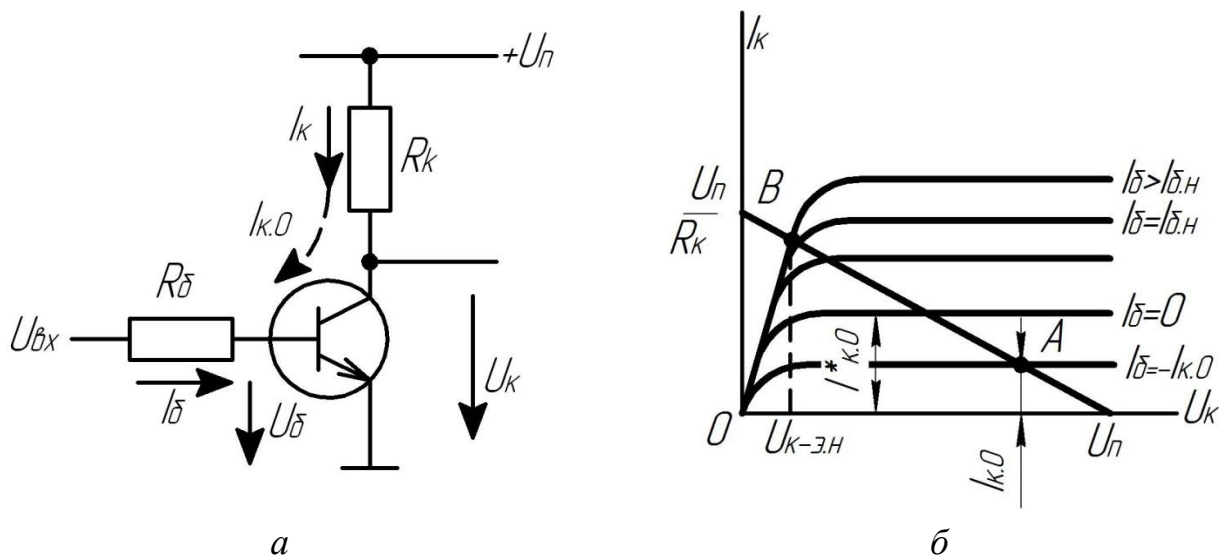


Рисунок 4.8 Транзисторный каскад с общим эмиттером:  
а - схема; б - нагрузочная диаграмма

Ключевой режим транзистора характеризуется двумя состояниями.

4 Режим отсечки (транзистор закрыт) — ключ разомкнут; через транзистор протекает минимальный ток, соответствующий точке  $A$  на диаграмме. Это имеет место, если  $U_{\varepsilon} < 0$ , т. е. эмиттерный переход закрыт, ток  $I_{\varepsilon} = 0$ , ток коллектора определяется обратным током коллекторного перехода  $I_{ко}$ , протекающим полностью по цепи базы. Мощность, потребляемая транзистором в режиме отсечки, минимальна.

5 Режим насыщения (ключ замкнут) характеризуется минимальным падением напряжения на транзисторе  $U_{\kappa} = U_{\kappa-\varepsilon.н} = 0$ , на диаграмме это точка  $B$ , а ток ограничен практически только  $R_{\kappa}$ , т. е.

$$I_{\kappa.н} = \frac{(U_{\Pi} - U_{\kappa-\varepsilon.н})}{R_{\kappa}} = \frac{U_{\kappa}}{R_{\kappa}}.$$

При малых значениях  $U_{\kappa} - U_{\kappa-\varepsilon} < U_{\varepsilon-\varepsilon}$  коллекторный переход оказывается прямосмещенным, как и эмиттерный, поэтому напряжения между электродами транзистора весьма малы (реально  $U_{\kappa-\varepsilon.н} = 0,05 \dots 1,0$  В).

На практике можно считать в режиме насыщения все электроды между собой закороченными, при этом говорят, что транзистор «стянут в точку». Режим насыщения достигается при

$$I_{\varepsilon} = I_{\varepsilon.н} = \frac{I_{\kappa.н}}{\beta} = \frac{U_{\Pi}}{\beta \cdot R_{\kappa}} = \frac{I_{\kappa.н}}{h_{21}}$$

где  $\beta$ ,  $h_{21}$  — коэффициент усиления по току в схеме с ОЭ,  $\beta = h_{21\varepsilon}$ .

Дальнейшее увеличение тока базы  $I_{\varepsilon} > I_{\varepsilon.н}$  не изменяет тока в коллекторной цепи. Тем не менее для надежности на практике берут  $I_{\varepsilon} > I_{\varepsilon.н}$ , и это превышение характеризуется «коэффициентом насыщения» транзистора  $S = I_{\varepsilon}/I_{\varepsilon.н} > 1$  (обычно  $S = 1,5 \dots 3$ ). Мощность, теряемая на транзисторе в режиме насыщения, невелика, так как мало напряжение  $U_{\kappa} = U_{\kappa-\varepsilon} \ll U_{\Pi}$ . Открытое состояние транзистора в режиме насыщения более устойчиво к воздействиям помех по входной цепи и изменению коэффициента передачи тока, в частности в зависимости от температуры.

Процессы в ключевой схеме при управлении прямоугольными импульсами проиллюстрированы на рисунке 4.9.

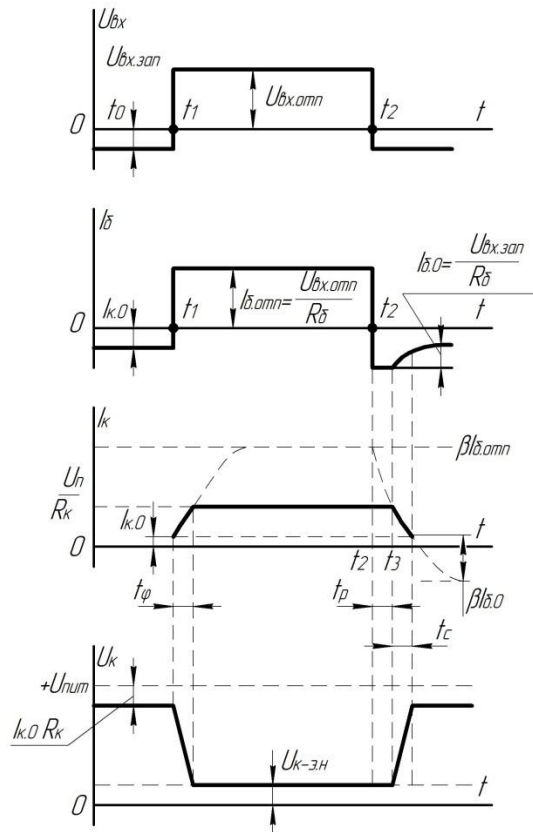


Рисунок 4.9 Процессы в ключевой схеме при управлении прямоугольными импульсами

На интервале  $t_0—t_1$  транзистор заперт напряжением  $U_{\text{вх зап}}$  отрицательной полярности. Токи  $I_{\text{б}}$  и  $I_{\text{к}}$  равны  $I_{\text{к.0}}$ . Напряжение на транзисторе  $U = U_{\text{н}} - I_{\text{к.0}} R_{\text{к}}$ . С момента  $t_1$  начинается процесс отпирания транзистора под действием входного положительного импульса. Ток  $I_{\text{к}}$  и напряжение  $U_{\text{к}}$  с момента  $t_{\text{к}}$  изменяются по экспоненте, что обусловлено инерционностью транзистора (за счет емкости коллекторного перехода  $C_{\text{к}}$ ).

Если

$$I_{\text{б.отп}} = \frac{U_{\text{вх.отп}}}{R_{\text{б}}} > I_{\text{б.н}},$$

то соответствующий ему ток коллектора  $I_{\text{к}}(t)$  будет изменяться по закону:

$$I_{\text{к}}(t) = \beta I_{\text{б.отп}} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_{\text{б}}}}),$$

где  $\tau_{\text{б}}$  — эквивалентная постоянная времени.

Ток коллектора  $I_{\text{к}}$  стремится к значению, определяемому по формуле:

$$I_K = \beta I_{\text{б.омн}} > \frac{U_{\Pi}}{R_K}.$$

По достижении значения  $U_{\Pi}/R_K$  в дальнейшем  $I_K$  не изменяется.

Время от момента  $t_1$  до момента достижения током  $I_K$  значения  $E_K/R_K$  называют длительностью фронта коллекторного импульса. Можно показать, что с ростом коэффициента насыщения длительность фронта импульса сокращается. В течение длительности фронта  $t_{\phi}$  напряжение на коллекторе транзистора изменяется по закону:

$$U_K(t) = U_n - I_K(t) \cdot R_K.$$

В момент  $t_2$  действие отпирающего импульса заканчивается, к базе транзистора прикладывается запирающее напряжение  $U_{\text{вх зап}}$ . Ток коллектора  $I_K$  и напряжение  $U_K$  с момента  $t_2$  в течение отрезка времени  $t_p$ , называемого «временем рассасывания», остаются постоянными. Это происходит в связи с тем, что в предыдущем режиме насыщения в базе накопились избыточные носители заряда (электроны), которые и поддерживают ток коллектора постоянным при своем уходе из базы в коллектор. Только после рассасывания избыточных носителей и перехода транзистора в активный режим (на пологие участки выходных характеристик) ток коллектора начинает уменьшаться, а напряжение на коллекторе — возрастать. Время рассасывания  $t_p$  тем больше, чем больше коэффициент насыщения  $S$ . Далее идет отрезок времени  $t_c$ , в течение которого коллекторный ток достигает значения  $I_{K0}$ , а  $U_K$  — значения  $(U_n - I_{K0} R_K)$ . Время  $t_c$  называется «временем среза» или временем заднего фронта коллекторного тока и определяется  $C_K$ . Длительности  $t_{\phi}$ ,  $t_p$ ,  $t_c$  характеризуют быстродействие ключа (это доли и единицы микросекунд).

Кремниевые транзисторы  $n-p-n$ , чаще используемые в ИМС, имеют весьма малый  $I_{K0}$  ( $I_{K0}$  создает падение напряжения на  $R_b$ , которое приоткрывает транзистор), поэтому можно считать, что эти транзисторы запираются при  $U_{\text{вх.зап}} = 0$ . Это позволяет исключить дополнительные источники запирающего напряжения, которые необходимы для германиевых транзисторов.

#### 4.4 Генераторы импульсных сигналов

Генераторы импульсных сигналов (импульсные генераторы) — это устройства, предназначенные для формирования импульсов различной формы.

Наиболее распространены генераторы прямоугольных и линейно изменяющихся (пилообразных) импульсов напряжения.

Генераторы импульсных сигналов могут работать в одном из трех режимов: автоколебательном, ждущем или синхронизации.

В автоколебательном режиме генераторы непрерывно формируют импульсные сигналы без внешнего воздействия. В ждущем режиме генераторы формируют импульсный сигнал лишь по приходе внешнего (запускающего) сигнала. В режиме синхронизации генераторы вырабатывают импульсы напряжения, частота которых равна или кратна частоте синхронизирующего сигнала.

#### 4.4.1 Генераторы прямоугольных импульсов

Генераторы прямоугольных импульсов делятся на мультивибраторы и блокинг-генераторы. И те и другие могут работать как в автоколебательном, так и в ждущем режимах.

##### **Автоколебательные мультивибраторы.**

Такие генераторы могут быть построены на дискретных, логических элементах или на операционных усилителях. Автоколебательный мультивибратор на основе ОУ представлен на рисунке 4.10.

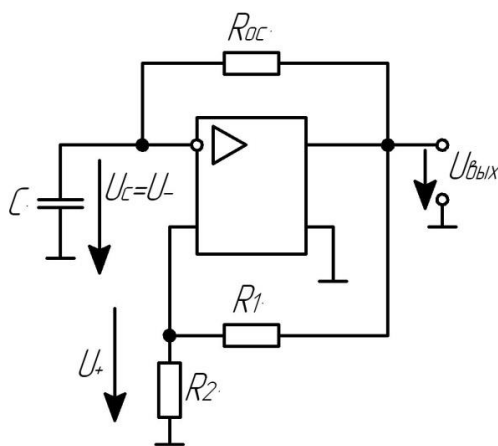


Рисунок 4.10 Схема автоколебательного мультивибратора на основе ОУ

В данной схеме с помощью резисторов  $R_1$  и  $R_2$  введена положительная обратная связь, что является необходимым условием для возникновения в схеме электрических колебаний. Принцип работы мультивибратора поясняют временные диаграммы, приведенные на рисунке 4.11.

В зависимости от напряжения на выходе (которое может быть равно либо  $+E_{num}$ , либо  $-E_{num}$ , где  $E_{num}$  - напряжения питания ОУ) на неинвертирующем входе ОУ устанавливается или напряжение  $U_{+1}$ , или напряжение  $U_{+2}$ .

Причем

$$U_{+1} = E_{пит} \frac{R_2}{R_1 + R_2}, U_{+2} = -E_{пит} \frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$

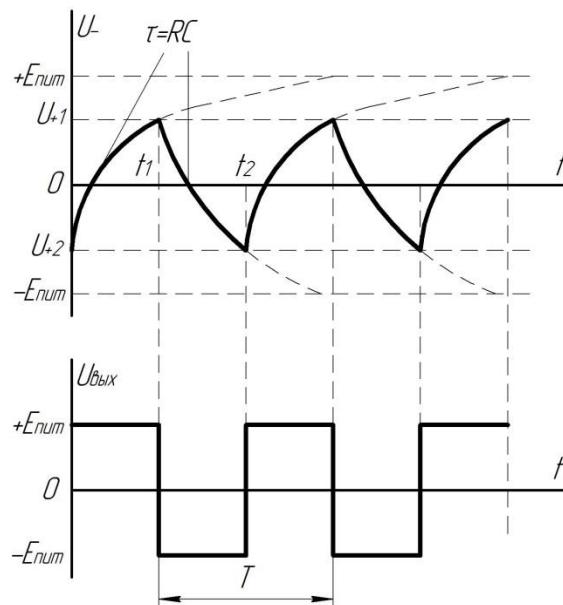


Рисунок 4.11 Временные диаграммы работы автоколебательного мультивибратора

Емкость  $C$ , входящая в цепь отрицательной обратной связи, перезаряжается с постоянной времени  $\tau = RC$ . Напряжение  $U_c$  на емкости, равное напряжению  $U_-$  на инвертирующем входе, стремится либо к уровню  $+E_{num}$  (при  $U_{вых} = +E_{num}$ ) либо уровню  $-E_{num}$  (при  $U_{вых} = -E_{num}$ ). До момента времени  $t_1$   $U_+ - U_- = U_{+1} - U_c > 0$ , следовательно, ОУ находится в режиме насыщения и на его выходе удерживается напряжение  $+E_{num}$ . После достижения момента времени  $t_1$  эта разность меняет знак, что приводит к изменению напряжения на выходе ОУ на  $-E_{num}$ . После момента времени  $t_1$  емкость  $C$  перезаряжается, причем ее напряжение стремится к уровню  $-E_{num}$ . Очевидно, что до момента времени  $t_2$   $U_+ - U_- = U_{+2} - U_c < 0$ , что и удерживает выходное напряжение ОУ на уровне  $-E_{num}$ . Начиная с момента времени  $t_2$  эта разность вновь меняет знак, происходит изменение напряжения  $U_{вых}$  и т. д. Таким образом, данный мультивибратор формирует прямоуголь-

ные импульсы напряжения. Период следования импульсов  $T$  определяется выражением:

$$T = 2 \cdot R \cdot C \cdot \ln\left(1 + 2 \frac{R_2}{R_1}\right).$$

В случае использования вместо резистора  $R$  двух разных резисторов и диодов можно построить несимметричный мультивибратор (рисунок 4.12, *а*), у которого длительности положительного и отрицательного импульсов не совпадают. Принцип работы мультивибратора поясняют временные диаграммы (рисунок 4.12, *б*).

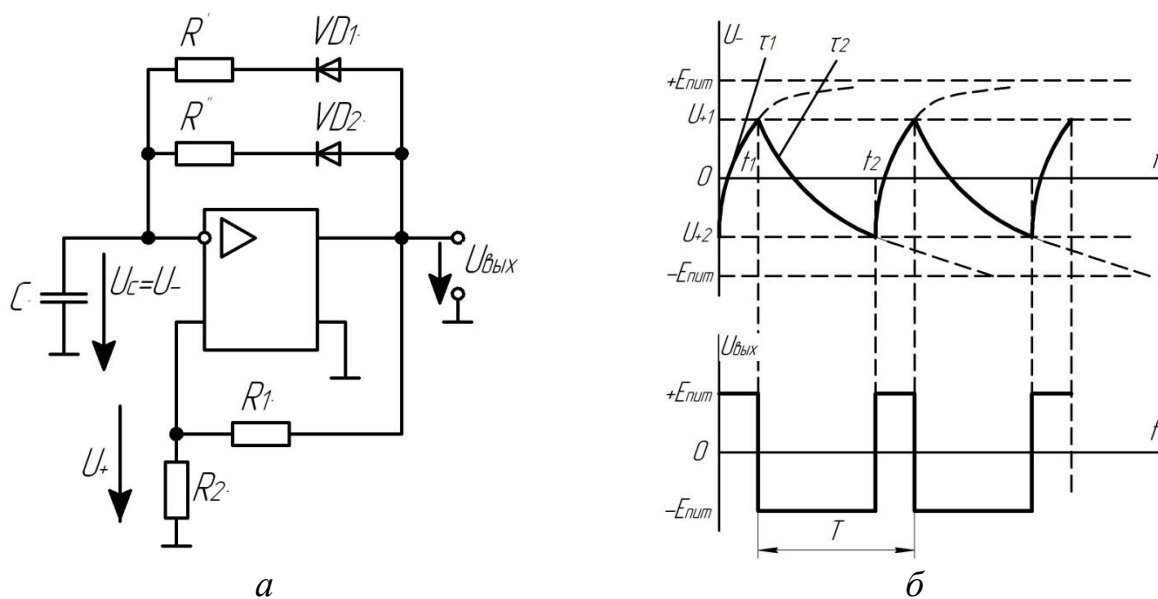


Рисунок 4.12 Несимметричный мультивибратор: *а* – схема; *б* – временные диаграммы работы

Из приведенных построений очевидно, что разная длительность положительного и отрицательного импульсов обеспечивается разными постоянными времени перезаряда емкостей  $\tau_1$  и  $\tau_2$ :

$$\tau_1 = R' \cdot C; \quad \tau_2 = R'' \cdot C,$$

где  $R'' > R'$ .

Рассмотрим ждущий мультивибратор на основе ОУ (рисунок 4.13), который иногда называют одновибратором.

Нетрудно заметить, что эта схема аналогична схеме автоколебательного мультивибратора, но в нее введены диод  $D_2$  (для осуществления ждущего режима) и цепь запуска на элементах  $C_1$ ,  $R_3$ ,  $D_1$  (рисунок 4.13, *а*). Схема имеет одно устойчивое состояние, когда напряжение на выходе отрицательное (примерно равно  $-E_{\text{num}}$ ). Если бы по

какой-либо причине напряжение на выходе оказалось положительным ( $+E_{num}$ ), то в результате рассматриваемых дальше процессов изменилось бы состояние схемы.

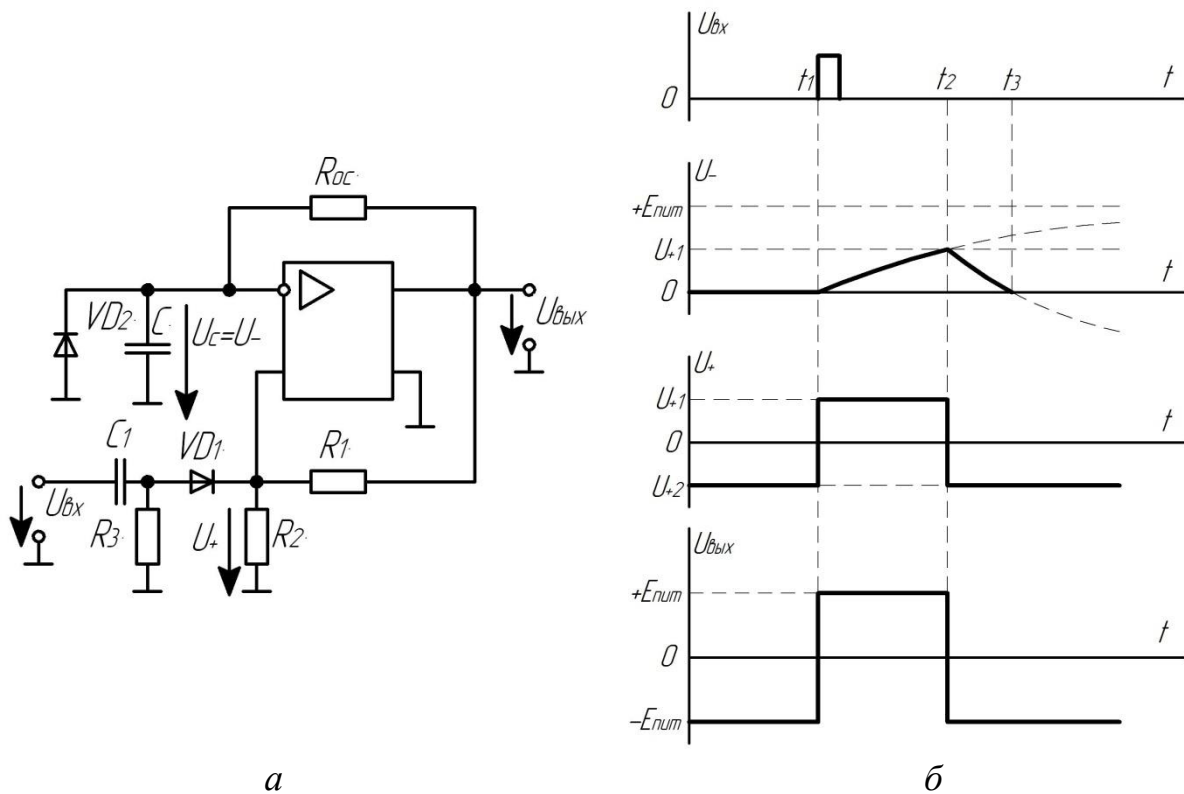


Рисунок 4.13 Одновибратор: *а* – схема; *б* - временные диаграммы его работы

В исходном состоянии (на выходе —  $E_{num}$ ) диод  $D_2$  открыт, напряжение на инвертирующем входе  $U_-$  примерно равно нулю, а напряжение  $U_+$  на неинвертирующем входе определяется выражением:

$$U_+ = U_{+2} = -E_{num} \frac{R_2}{R_1 + R_2}, \quad U_+ - U_- < 0 \text{ и } U_{вых} = -E_{num}.$$

Диод  $D_1$ , подключенный к неинвертирующему входу, закрыт. В момент времени  $t_1$  входной сигнал открывает этот диод, на неинвертирующий вход подается положительный сигнал (на инвертирующем входе остается нулевой сигнал), и ОУ переходит в режим с положительным напряжением на выходе. После этого начинается заряд конденсатора  $C$ . Когда напряжение  $U_{+1}$ , определяемого выражением  $U_{+1} = E_{num} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$ , дифференциальный сигнал  $U_+ - U_-$  становится отрицательным и ОУ воз-

вращается в исходное устойчивое состояние (в таком состоянии дифференциальный сигнал отрицательный).

Из временных диаграмм (рисунок 4.13, б) следует, что лишь после момента времени  $t_3$  можно подавать очередной запускающий импульс.

**Блокинг-генераторами** называются устройства, предназначенные для получения мощных импульсов малой длительности (от долей микросекунды до долей миллисекунды) и скважностью до нескольких десятков тысяч. Основным элементом таких генераторов является импульсный трансформатор. Блокинг-генератор может работать в автоколебательном, ждущем режимах или режиме синхронизации. Рассмотрим схему автоколебательного блокинг-генератора (рисунок 4.14, а).

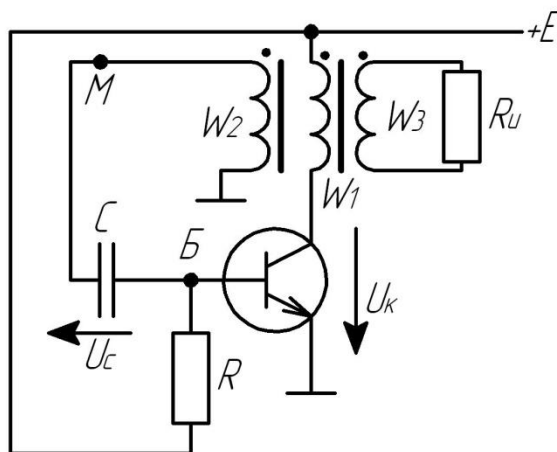


Рисунок 4.14 Схема автоколебательного блокинг-генератора

Во время паузы (выходное напряжение отсутствует) происходит перезаряд конденсатора по цепи  $E - R - W_2$  с постоянной времени  $\tau_1 = RC$ . В момент времени, когда напряжение на конденсаторе  $C$  (и, следовательно, на базе транзистора) становится равным нулю, транзистор начинает открываться (выходить из режима отсечки), начинает протекать ток коллектора, что вызывает появление сигнала положительной обратной связи (через обмотку трансформатора  $W_2$ ), под действием которой транзистор скачкообразно переходит в режим насыщения.

При этом конденсатор  $C$  перезаряжается по цепи  $W_2 - C$  - входное сопротивление транзистора  $r_{ex}$  с постоянной времени  $\tau_2 = r_{ex} C$ . При увеличении напряжения на конденсаторе  $C$  ток базы начинает уменьшаться и в конце концов транзистор выходит из насыщения и

начинает закрываться. Возникает сигнал положительной обратной связи, который скачкообразно переводит транзистор в запертое состояние. После этого энергия, запасенная в индуктивности намагничивания, рассеивается на сопротивлении нагрузки. Так как  $r_{ex} \ll R$ , то время нахождения транзистора в открытом состоянии  $t_u$ , а следовательно, и длительность импульса на нагрузке значительно меньше периода следования импульсов. Временные диаграммы работы автоколебательного блокинг-генератора приведены на рисунке 4.15.

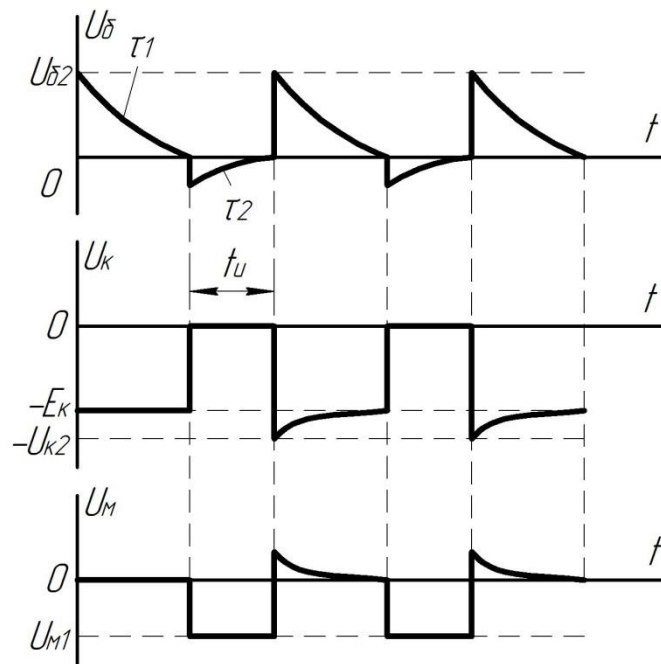


Рисунок 4.15 Временные диаграммы работы блокинг-генератора

#### 4.4.2 Генераторы линейно изменяющегося напряжения

Линейно изменяющимся напряжением (ЛИН) называют напряжение, которое в течение промежутка времени, называемого рабочим ходом, изменяется по линейному закону, а затем в течение промежутка времени, называемого обратным ходом, возвращается к исходному уровню (рисунок 4.16).

Устройства, предназначенные для формирования ЛИН, называют генераторами ЛИН (ГЛИН). Генераторы ЛИН часто называют генераторами пилообразного напряжения.

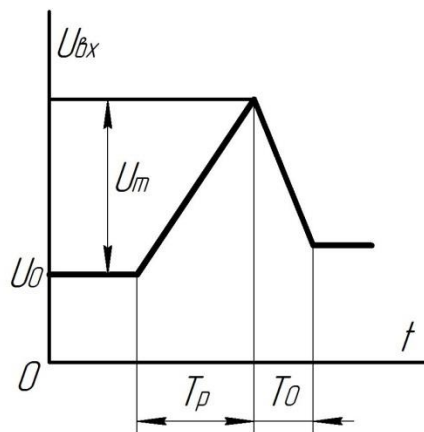


Рисунок 4.16 График линейно изменяющегося напряжения

На рисунке 2.16 применены следующие обозначения:

$U_m$  - амплитуда (высота) импульса;

$T_p$  - время рабочего хода импульса;

$T_o$  - время обратного хода импульса.

Принцип построения генераторов ЛИН (рисунок 4.17) основан на заряде емкости постоянным или почти постоянным током.



Рисунок 4.17 Структурная схема ГЛИН: *а* – в ждущем режиме;  
*б* – в автоколебательном режиме

Основой ГЛИН является емкость, через которую от источника постоянного тока (ИТ) протекает постоянный ток, благодаря чему при разомкнутом ключевом устройстве (КУ) напряжение на емкости изменяется по линейному закону, т.е. напряжение на емкости определяется по формуле:

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

При замыкании КУ емкость разряжается через сопротивление КУ и т. д.

ГЛИН могут работать либо в ждущем (рисунок 4.17, а), либо в автоколебательном режиме (рисунок 4.17, б). В ГЛИН в ждущем режиме для получения ЛИН необходим внешний импульс напряжения  $U_{вх}$ , а ГЛИН в автоколебательном режиме формирует ЛИН регулярно.

Все ГЛИН можно разделить на три типа:

- а) с интегрирующей  $RC$  - цепочкой;
- б) с токостабилизирующим двухполюсником;
- в) с компенсирующей обратной связью (ОС).

Рассмотрим ГЛИН с интегрирующей  $RC$  – цепочкой, схема которого представлена на рисунке 4.18, а.

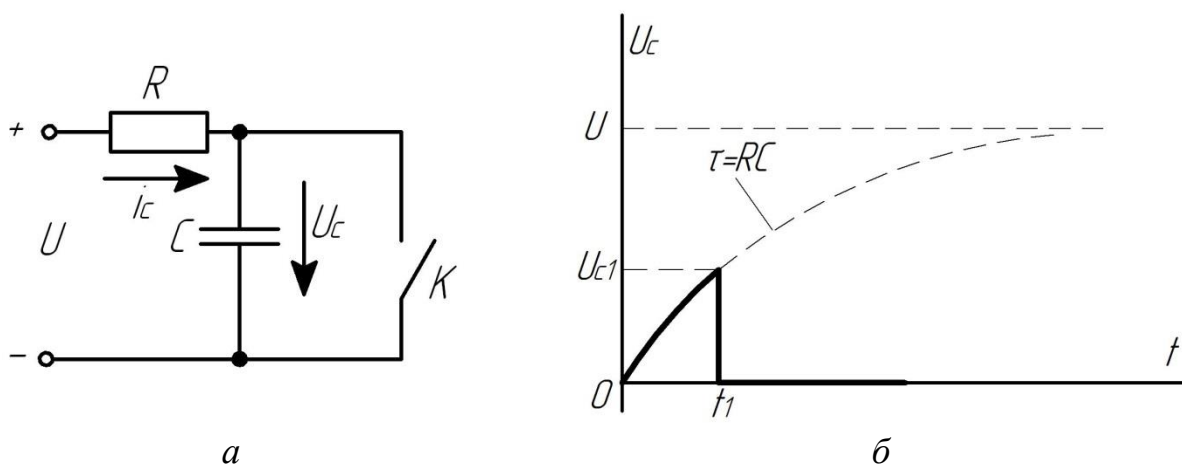


Рисунок 4.18 ГЛИН с интегрирующей  $RC$  – цепочкой: а – схема; б - временной график изменения напряжения на конденсаторе

В этой схеме ток на конденсаторе определяется

$$i_c = \frac{U - U_c}{R}, \quad i_c = C \frac{dU_c}{dt}.$$

Левые части двух уравнений равны, поэтому будут равны и правые части, т.е.

$$\frac{dU_c}{dt} = \frac{U - U_c}{R}.$$

При  $\tau = RC \gg t_1$  напряжение на конденсаторе  $U_c \ll U$  и, следовательно, на отрезке времени  $[0, 1]$   $\frac{dU_c}{dt} = \frac{U}{R} = const$ , т. е. на начальном участке экспоненты скорость изменения напряжения  $U_c$  примерно постоянна и при малых значениях  $t$  формируется ЛИН.

Такой генератор может быть реализован на основе транзисторного ключа (рисунок 4.19).

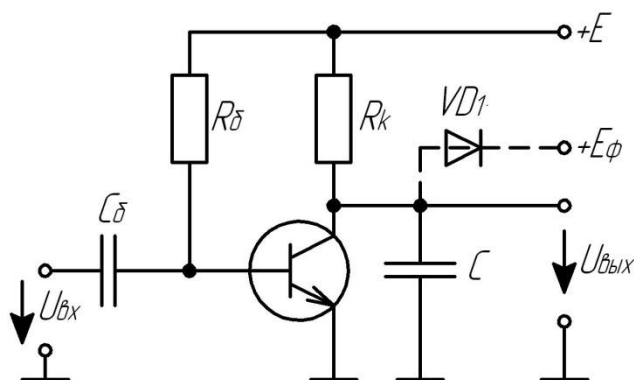


Рисунок 4.19 Схема ГЛИН с интегрирующей  $RC$  - цепочкой

Рассмотрим принцип работы данного генератора. Временные диаграммы, поясняющие принцип работы ГЛИН с интегрирующей  $RC$  – цепочкой, приведены на рисунке 4.20.

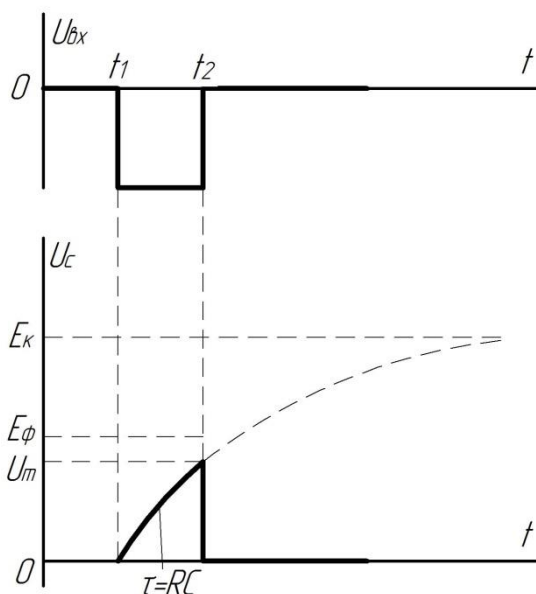


Рисунок 4.20 Временные диаграммы работы ГЛИН с  $RC$  – цепочкой

До момента времени  $t_1$  транзисторный ключ находится в режиме насыщения, т. е. напряжение коллектор-эмиттер  $U_{кэ}$ , а значит, и выходное напряжение генератора  $U_{вых}$  равны нулю. При подаче в момент времени  $t_1$  запирающего импульса напряжения транзистор входит в режим отсечки, и емкость  $C$  заряжается от источника  $E_k$  через сопротивление  $R_k$ , причем напряжение на емкости стремится к уровню  $E_k$ . В момент времени  $t_2$  транзистор вновь входит в режим насыщения, и емкость через малое сопротивление промежутка коллектор-

эмиттер транзистора разряжается. Если промежуток времени  $t_2 - t_1$  гораздо меньше  $RC$ , то, как было показано выше, напряжение на емкости изменяется по линейному закону. Для предотвращения пробоя транзистора (например, при увеличении длительности входного импульса) к его коллектору подключен диодный ограничитель ( $VD_1$ ,  $E_\phi$ ). Если по какой-либо причине напряжение на емкости увеличивается, то, как только оно достигнет уровня  $E_\phi$ , диод  $D$  открывается и напряжение  $U_{вых}$  удерживается на уровне  $E_\phi$ .

Достоинством данных генераторов является простота их реализации. Существенным их недостатком является то, что для получения малого коэффициента нелинейности необходимо, чтобы напряжение генератора  $U$  было гораздо (на порядок и более) больше амплитуды ЛИН.

### Вопросы для самоконтроля

- 1) Какие устройства называются импульсными?
- 2) Перечислите достоинства импульсных устройств по сравнению с аналоговыми?
- 3) Какими параметрами характеризуется импульсный сигнал?
- 4) Какие устройства являются простейшими формирователями импульсов?
- 5) Какое устройство называется триггером Шмитта?
- 6) Что называется электронным ключом?
- 7) Перечислить режимы работы электронного ключа?
- 8) Пояснить принцип работы электронного ключа?
- 9) Что называется генератором импульсных сигналов?
- 10) Охарактеризуйте режимы работы генераторов?
- 11) Пояснить принцип работы мультивибратора?
- 12) Пояснить принцип работы одновибратора?
- 13) Пояснить принцип работы блокинг-генератора?
- 14) Какие генераторы называются генераторами линейно изменяющегося напряжения?
- 15) Пояснить принцип работы ГЛИН?
- 16) Перечислить достоинства и недостатки ГЛИН?

## 5 ЦИФРОВЫЕ УСТРОЙСТВА

### 5.1 Логические операции и алгебра логики

Цифровыми называются устройства, предназначенные для получения и обработки информации в цифровой форме. Цифровыми называются сигналы, близкие к прямоугольным и имеющие два фиксированных уровня: низкий с символом «0» и высокий с символом «1». При этом обычно имеется в виду уровни напряжения, а не тока. Важным является не абсолютные значения амплитуд напряжений для высокого и низкого уровня, а их четко различимая разность. Величины «0» и «1» называются логическими переменными.

Изобразим диаграмму, поясняющую изложенное (рисунок 5.1).

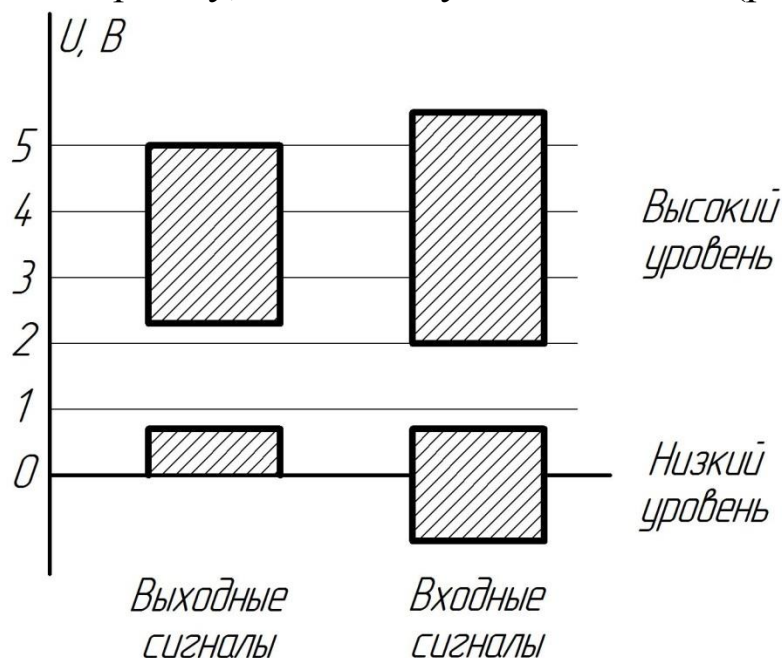


Рисунок 5.1 Соотношение высокого и низкого уровня сигналов

На этой диаграмме, соответствующей цифровым схемам транзисторно-транзисторной логики (ТТЛ), имеющей напряжение питания 5 В, укажем диапазоны напряжений для входных и выходных сигналов (заштрихованные прямоугольники). Это такие диапазоны, что сигнал, оказавшись в одном из них, безошибочно квалифицируется как сигнал высокого или низкого уровня. Если высокому уровню сигналов ставится в соответствие состояние «1», а низкому — состояние «0», то говорят о так называемой позитивной логике. Если высокому уровню соответствует состояние «0», а низкому — «1», то говорят о так называемой негативной логике.

Транзисторный ключ является основным элементом устройств цифровой электроники. Параметры и характеристики транзисторного ключа в очень большой степени определяют свойства соответствующих схем.

Для описания алгоритмов работы и структуры логических схем используют простую алгебру логики, или булеву алгебру, называемую по имени разработавшего ее в середине XIX века ирландского математика Д. Буля. В ее основе лежат три основные логические операции:

- логическое отрицание, или операция НЕ (инверсия);
- логическое сложение, или операция ИЛИ (дизъюнкция);
- логическое умножение, или операция И (конъюнкция).

Рассмотрим сущность перечисленных логических операций.

Операция НЕ означает, что логическая функция  $y$  противоположна аргументу  $x$ . Логической функцией называется булево выражение, состоящее из логических переменных, связанных операциями НЕ, ИЛИ, И.

Аналитически операция НЕ над переменной  $x$  записывается в виде  $y = \bar{x}$  (читается  $y$  не  $x$ ).

Таблицей истинности называется таблица, содержащая все возможные комбинации значений входных переменных и соответствующие им значения логической функции.

Операцию НЕ определяют с помощью таблицы истинности (таблица 5.1).

Таблица 5.1 Таблица истинности операции НЕ

$x$	$y$
0	1
1	0

Функция  $y$  принимает значение «1», когда переменная  $x$  равна «0», и, наоборот, функция  $y$  принимает значение «0», когда переменная  $x$  – «1».

Условное обозначение, схема реализации и схема замещения операции НЕ приведены на рисунке 5.2.

Операция ИЛИ означает, что логическая функция  $y$  принимает значение единицы, если хотя одна из логических переменных равна единице.

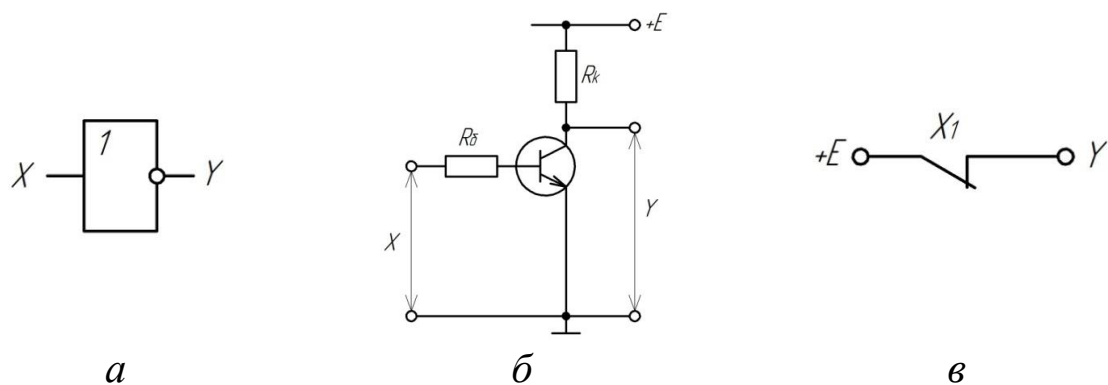


Рисунок 5.2 Операции НЕ: *а* - условное обозначение, *б* - схема реализации; *в* - схема замещения

Аналитически операция ИЛИ, когда есть две логические переменные  $x_1$  и  $x_2$ , записывается следующим образом:  $y = x_1 + x_2$ .

Определяют дизъюнкцию с помощью таблицы истинности (таблица 5.2).

Таблица 5.2 Таблица истинности операции ИЛИ

$x_1$	$x_2$	$y$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Логическая операция ИЛИ реализуется в логических интегральных схемах, имеющих два и более входа и один выход, который принимает значение «1» всякий раз, когда хотя бы один из её входов подается «1».

Условное обозначение, схема реализации и схема замещения операции ИЛИ приведены на рисунке 5.3.

Операция И означает, что логическая функция  $y$  принимает значение единицы, если все логические переменные равны единице.

Аналитически операция И, когда есть две логические переменные  $x_1$  и  $x_2$ , следующим образом:  $y = x_1 \cdot x_2$ .

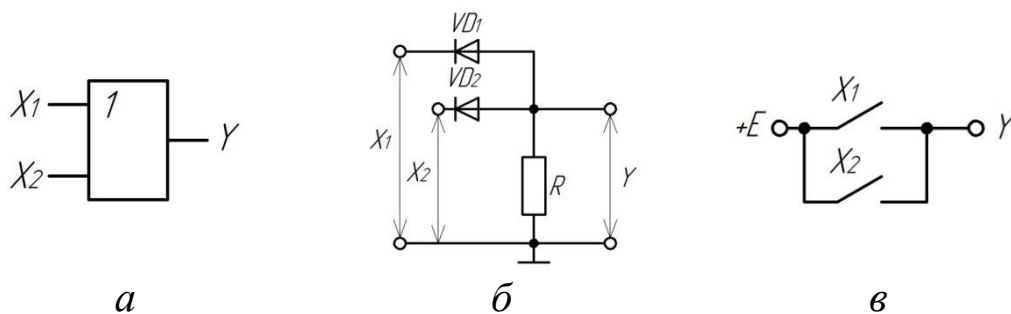


Рисунок 5.3 Операции ИЛИ: *а* - условное обозначение, *б* - схема реализации; *в* - схема замещения

Определяют конъюнкцию с помощью таблицы истинности (таблица 5.3).

Таблица 5.3 Таблица истинности операции И

$x_1$	$x_2$	$y$
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Логическая операция И реализуется в логических интегральных схемах с двумя и более входами и одним выходом, на котором появляется сигнал «1» только тогда, когда на все входы подается «1».

Условное обозначение, схема реализации и схема замещения операции ИЛИ приведены на рисунке 5.4.

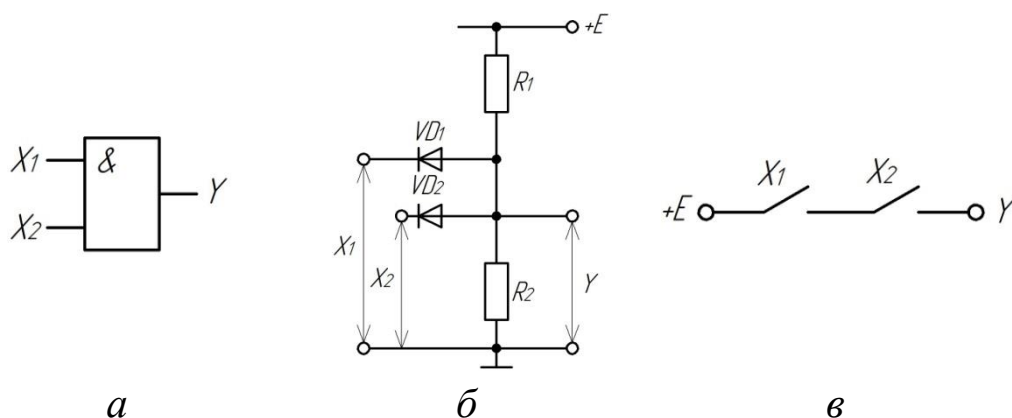


Рисунок 5.4 Операции И: *а* - условное обозначение, *б* - схема реализации; *в* - схема замещения

Алгебра логики — алгебра состояний, а не чисел. Она позволяет:

1) математически записать логические уравнения и связи между ними; 2) реализовать логические уравнения в виде логических схем, т. е. перейти от аналитического описания процесса к его схемной реализации в виде логического автомата;

3) сделать оптимальной реализацию логических автоматов (минимизировать число элементов, обеспечить их однородность и т. д.).

Логические операции могут быть представлены графически с помощью диаграмм Вейча (рисунок 5.5).

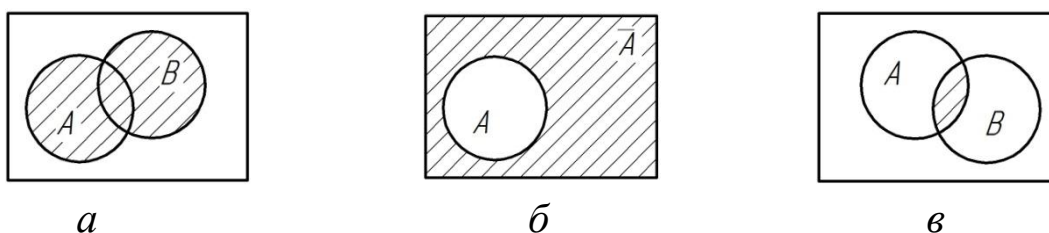


Рисунок 5.5 Графическое представление логических операций с помощью диаграмм Вейча: *а* - ИЛИ ( $A + B$ ); *б* - НЕ ( $\bar{A}$ ); *в* - И ( $A \cdot B$ )

В алгебре логики принят следующий порядок выполнения логических операций: сначала выполняют операцию НЕ, затем операцию И, а потом операцию ИЛИ. Для изменения порядка операций применяют скобки. Вычитания и деления переменных в алгебре логики нет. Однако, как и в обычной алгебре, действуют законы. Рассмотрим их.

Переместительный закон или закон коммутативности используется для сложения и умножения. Математически записывается следующим образом:

$$A + B + C = A + C + B = B + A + C;$$

$$A \cdot B \cdot C = A \cdot C \cdot B = B \cdot A \cdot C.$$

Сочетательный закон или закон ассоциативности математически записывается:

$$A + B + C = A + (B + C) = (A + B) + C;$$

$$A \cdot B \cdot C = A \cdot (B \cdot C) = (A \cdot B) \cdot C.$$

Скобки используют для изменения порядка действий, как в обычной алгебре.

Распределительный закон или закон дистрибутивности математически записывается следующим образом:

$$A \cdot (B + C) = A \cdot B + A \cdot C.$$

Для осуществления операций над логическими сообщениями используют следующие тождества:

- |                        |                            |                                       |
|------------------------|----------------------------|---------------------------------------|
| 1) $A + A = A$ ;       | 5) $A \cdot A = A$ ;       | 9) $\bar{\bar{A}} = A$ ;              |
| 2) $A + \bar{A} = 1$ ; | 6) $A \cdot \bar{A} = 0$ ; | 10) $A + A \cdot B + A \cdot C = A$ ; |
| 3) $A + 0 = A$ ;       | 7) $A \cdot 0 = 0$ ;       | 11) $A + \bar{A} \cdot B = A + B$ .   |
| 4) $A + 1 = 1$ ;       | 8) $A \cdot 1 = A$ ;       |                                       |

Следующие два тождества называют либо формулами, либо теоремами де Моргана, либо законами инверсий, а именно:

12)  $\bar{A} + \bar{B} + \bar{C} = \overline{A \cdot B \cdot C}$  — сумма инверсий равна инверсии произведения;

13)  $\overline{A \cdot B \cdot C} = \bar{A} + \bar{B} + \bar{C}$  — произведение инверсий равно инверсии суммы.

Для построения цифрового устройства достаточно иметь элементы, реализующие логические операции НЕ, ИЛИ, И. Если соединить логические элементы в соответствии со структурой выражения для логических функций, то можно получить цифровое устройство, реализующее заданную логическую функцию.

При проектировании цифровых устройств рекомендуется следующая последовательность действий:

- 1) по условию работы устройства определяется, что именно должно выполнять устройство и уточняется алгоритм его работы;
- 2) составляется таблица истинности для логической функции, реализованной устройством;
- 3) составляется логическая функция и проводится её минимизация;
- 4) с использованием логических элементов разрабатывается схема проектируемого устройства.

Логические устройства разделяют на два класса: комбинационные и последовательностные.

## 5.2 Комбинационные цифровые устройства

Комбинационным называют цифровое устройство, выходные сигналы которого в некоторый момент времени однозначно определяются входными сигналами, имеющими место в этот момент времени.

*Шифратор* — это комбинационное устройство, преобразующее десятичные числа в двоичную систему счисления, причем каждому

входу может быть поставлено в соответствие десятичное число, а набор выходных логических сигналов соответствует определенному двоичному коду. Число входов и выходов в полном шифраторе связано соотношением  $n=2^m$ , где  $n$  – число входов,  $m$  – число выходов.

Шифратор иногда называют «кодером» используют, например, для перевода десятичных чисел, набранных на клавиатуре в двоичный код. Рассмотрим пример построения шифратора для преобразования десятиразрядного единичного кода (десятичных чисел от 0 до 9) в двоичный код. Условное изображение такого шифратора и таблица соответствия кода приведены на рисунке 5.6. Используя данную таблицу соответствия, запишем логические выражения, включая в логическую сумму те входные переменные, которые соответствуют единице некоторой выходной переменной.

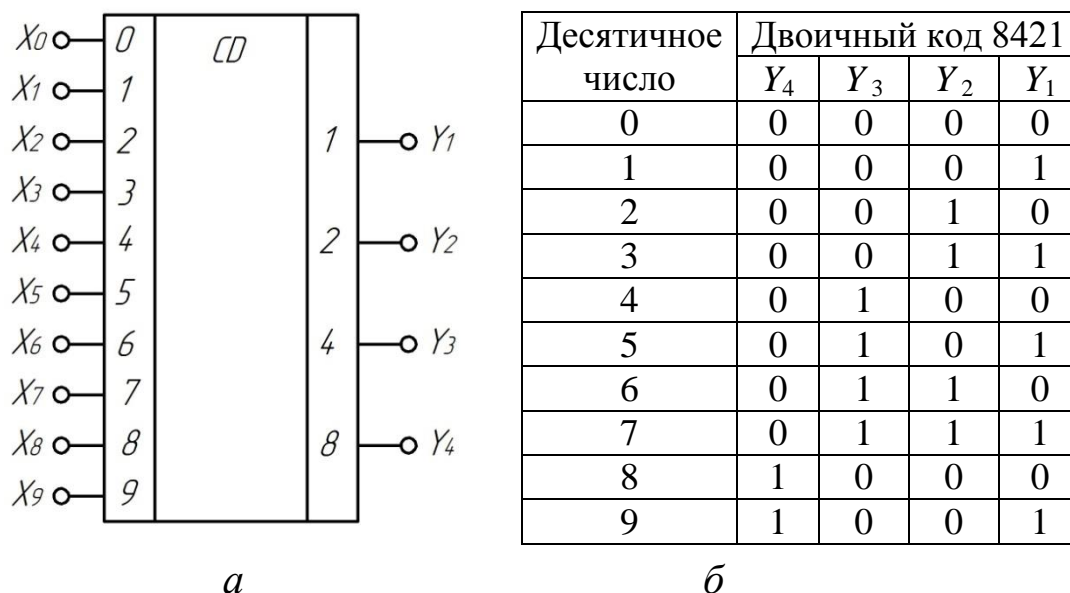


Рисунок 5.6 Шифратор: *a* – условное обозначение; *б* - таблица соответствия кода

Так, на выходе  $Y_1$  будет логическая «1» тогда, когда логическая «1» будет или на входе  $x_1$ , или  $x_2$ , или  $x_5$ , или  $x_7$ , или  $x_9$ .

$$Y_1 = x_1 + x_2 + x_5 + x_7 + x_9; \quad Y_2 = x_2 + x_3 + x_6 + x_7;$$

$$Y_3 = x_4 + x_5 + x_6 + x_7; \quad Y_4 = x_8 + x_9.$$

На рисунке 5.7 приведена схема шифратора на логических элементах ИЛИ.

Если на всех входах – логическая единица, то на всех выводах также логическая единица, что соответствует числу 0 в так называемом инверсном коде (1111). Если хотя бы на одном входе имеется

логический ноль, то состояние выходных сигналов определяется наибольшим номером входа, на котором имеется логический ноль, и не зависит от сигналов на входах, имеющих меньший номер.

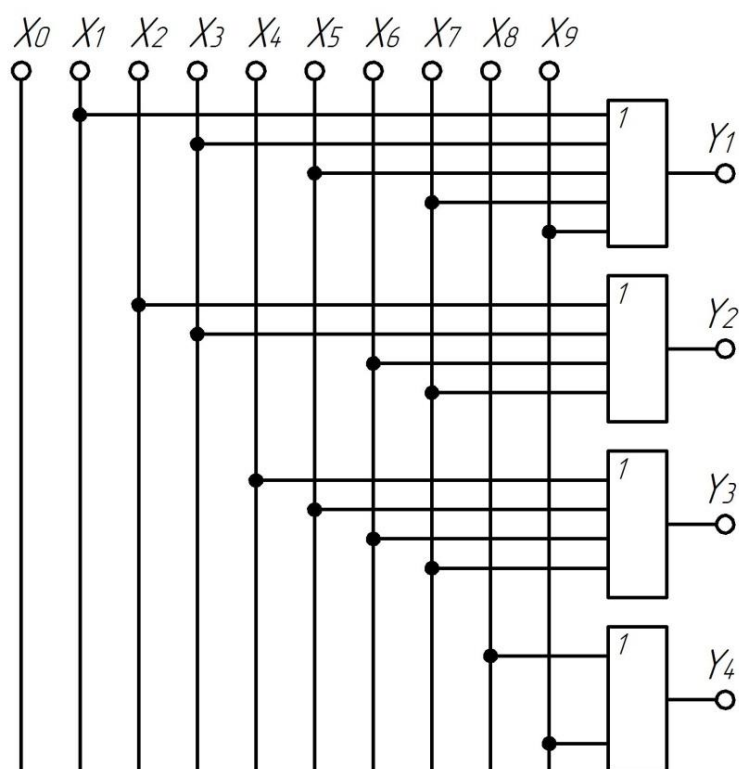


Рисунок 5.7 Шифратор на логических элементах ИЛИ

Основное назначение шифратора – преобразование номера источника сигнала в код (например, номера нажатой кнопки некоторой клавиатуры).

*Дешифратором* называется комбинационное устройство, преобразующее  $n$ -разрядный двоичный код в логический сигнал, появляющийся на том выходе, десятичный номер которого соответствует двоичному коду. Число входов и выходов в так называемом полном дешифраторе связано соотношением  $m = 2^n$ , где  $n$  – число входов, а  $m$  – число выходов.

Если в работе дешифратора используется неполное число выходов, то такой дешифратор называется неполным. Так, например, дешифратор, имеющий 4 входа и 16 выходов, будет полным, а если бы выходов было только 10, то он являлся бы неполным.

Обратимся для примера к схеме дешифратора К555ИД6 серии К555, приведенной на рисунке 5.8.

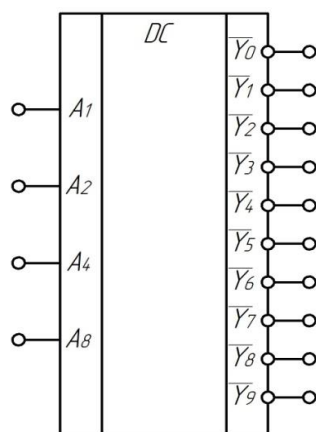


Рисунок 5.8 Схема дешифратора К555ИД6

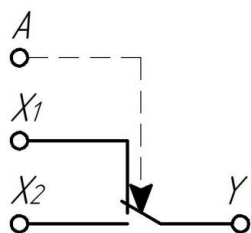
Дешифратор имеет 4 прямых входа, обозначенных через  $A_1, \dots, A_8$ . Аббревиатура  $A$  обозначает «адрес». Указанные входы называют адресным. Цифры определяют значения активного уровня (единицы) в соответствующем разряде двоичного числа. Дешифратор имеет 10 инверсных выходов  $\bar{Y}_0, \dots, \bar{Y}_9$ . Цифры определяют десятичное число, соответствующее заданному двоичному числу на входах. Значение активного уровня «0» имеет тот выход, номер которого равен десятичному числу, определяемому двоичным числом на входе. Например, если на всех входах – логические нули, то на выходе  $\bar{Y}_0$  – логический «0», а на остальных выходах – логическая единица. Если на входе  $A_2$  – логическая единица, а на остальных входах – логический «0», то на выходе  $\bar{Y}_2$  – логический «0», а на остальных выходах – логическая «1». Если на входе – двоичное число, превышающее 9 (например, на всех входах «1», что соответствует десятичному числу 15), то всех выходах – логическая единица.

Дешифратор – одно из широко используемых логических устройств. Его применяют для построения различных комбинационных устройств. Шифраторы и дешифраторы являются примерами простейших преобразователей кодов.

Мультиплексором называют комбинационное устройство, обеспечивающее передачу в желаемом порядке цифровой информации, поступающей по нескольким входам на один выход. Мультиплексоры обозначают через  $MUX$  или  $MS$ . Функционально мультиплексор можно изобразить в виде коммутатора, обеспечивающего подключение одного из нескольких информационных входов ( $X_1, X_2, \dots$ ) к одному выходу  $Y$  устройства. Кроме информационных входов в мультиплексоре имеются адресные входы  $A$  и разрешающие (стробирующие). Сигналы на адресных входах определяют, какой конкретно информа-

ционный канал подключен к выходу. Если между числом информационных входов  $n$  и числом адресных входов  $m$  действует соотношение  $n=2^m$ , то такой мультиплексор называют полным. Если  $n < 2^m$ , то мультиплексор называют неполным.

Рассмотрим функционирование двухвходового мультиплексора ( $2 \rightarrow 1$ ), который условно изображен в виде коммутатора, а состояние его входов  $X_1$ ,  $X_2$  и выхода  $Y$  приведено в таблице (рисунок 5.9).



Адресный вход	Выход $Y$
0	$X_1$
1	$X_2$

Рисунок 5.9 Двухвходовый мультиплексор

Исходя из таблицы, можно записать следующее уравнение:

$$Y = X_1 \cdot \bar{A} + X_2 \cdot A$$

Реализация и условное графическое обозначение такого устройства представлены на рисунке 3.10. Основой данной схемы являются две схемы совпадения на элементах И, которые при логическом уровне «1» на одном из своих входов повторяют на выходе то, что есть на другом входе.

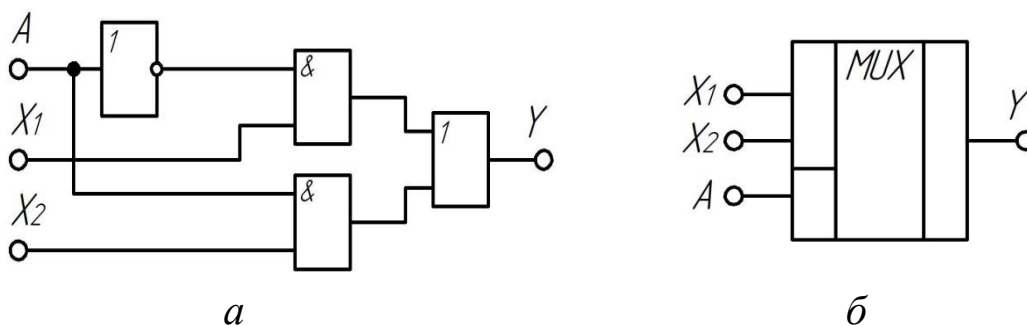


Рисунок 3.10 Двухвходовой мультиплексор: *а* - реализация на логических элементах И; *б* - его условное обозначение

Мультиплексоры являются универсальными логическими устройствами, на основе которых создают различные комбинационные и последовательностные схемы. Мультиплексоры могут исполь-

зовать в делителях частоты, триггерных устройствах, сдвигающих устройствах, для преобразования параллельного двоичного кода в последовательный и др.

Демультимплексором называют устройство, в котором сигналы с одного информационного входа поступают в желаемой последовательности по нескольким выходам в зависимости от кода на адресных шинах. Таким образом, демультимплексор в функциональном отношении противоположен мультимплексору. Демультимплексоры обозначают через *DMX* или *DMS*.

Если соотношение между числом выходов  $n$  и числом адресных входов  $m$  определяется равенством  $n=2^m$ , то такой демультимплексор называют полным, при  $n < 2^m$  демультимплексор является неполным.

Рассмотрим функционирование демультимплексора с двумя выходами, который условно изображен в виде коммутатора, а состояние его входов приведено в таблице (рисунок 5.11).

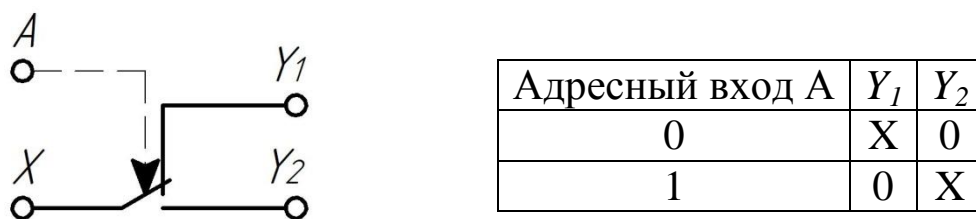


Рисунок 5.11 Функциональная схема демультимплексора с двумя выходами

Из этой таблицы следует:

$$Y_1 = X \cdot \bar{A}; \quad Y_2 = X \cdot A.$$

Реализация такого устройства на логических элементах И показано на рисунке 5.12.

Функции демультимплексоров сходны с функциями дешифраторов. Дешифратор можно рассматривать как демультимплексор, у которого информационный вход поддерживает напряжение выходов в активном состоянии, а адресные входы выполняют роль входов дешифратора. Поэтому в обозначении как дешифраторов, так и демультимплексоров используются одинаковые буквы – ИД. Выпускают дешифраторы (демультимплексоры) К155ИД3, К531ИД7 и др.

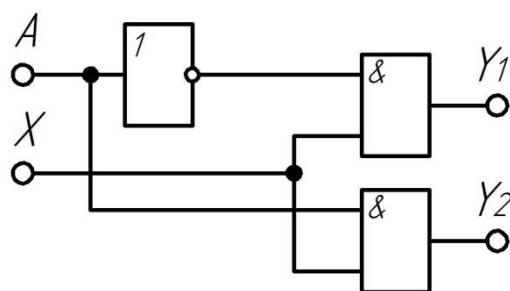


Рисунок 5.12 Реализация демультиплексора с двумя выходами на логических элементах И

Сумматоры – это комбинационные устройства, предназначенные для сложения чисел. Рассмотрим сложение двух одноразрядных двоичных чисел, для чего составим таблицу сложения (таблицу истинности), в которой отразим значения входных чисел А и В, значение результата суммирования  $S$  и значение переноса в старший разряд  $P$  (рисунок 5.13).

A	B	P	S
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	1	0

Рисунок 5.13 Таблица истинности полусумматора

Работа устройства, реализующего таблицу истинности, описывается следующими уравнениями

$$S = A \cdot \bar{B} + \bar{A} \cdot B; \quad P = A \cdot B.$$

Очевидно, что по отношению к столбцу  $S$  реализуется логическая функция «исключающее ИЛИ», т.е.  $S = \overline{A + B}$ .

Устройство, построенное на основе таблицы, изображенной на рисунке 5.14, называют полусумматором.

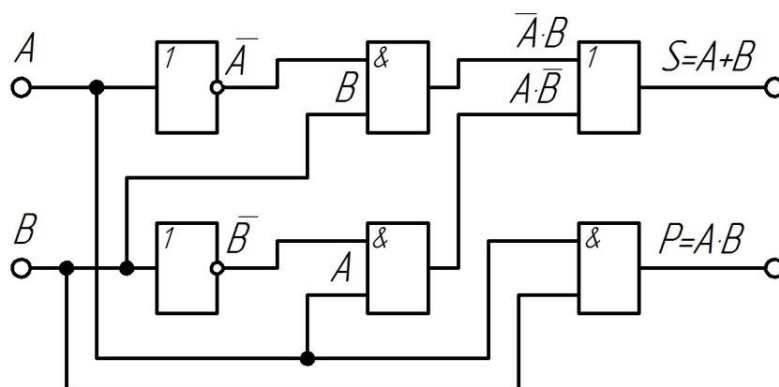


Рисунок 5.14 Схема полусумматора

Поскольку полусумматор имеет только два входа, он может использоваться для суммирования лишь в младшем разряде.

При суммировании двух многоразрядных чисел для каждого разряда (кроме младшего) необходимо использовать устройство, имеющее дополнительный вход переноса. Такое устройство (рисунок 5.15) называют полным сумматором и его можно представить как объединение двух полусумматоров ( $P_{вх}$  – дополнительный вход переноса). Сумматор обозначают через  $SM$ .

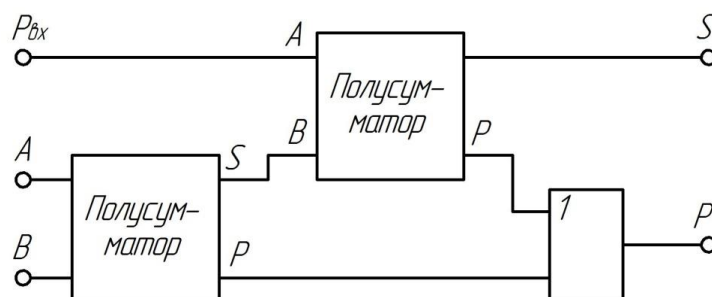


Рисунок 5.15 Схема полного сумматора

Соединяя определенным образом полусумматоры и полные сумматоры друг с другом, получают устройство для выполнения сложения нескольких разрядов двоичных чисел.

### 5.3 Последовательностные цифровые устройства

Последовательностным устройством (конечным автоматом, цифровым автоматом, автоматом с памятью) называются цифровое устройство, выходные сигналы которого определяются не только

сигналами, имеющимися на входе в данный момент времени, но и состоянием элементов памяти. Таким образом, реакция последовательностного устройства на определенные входные сигналы зависит от предыстории его работы.

Триггер – простейшее последовательностное устройство, которое может находиться в одном из двух возможных состояний и переходить из одного состояния в другое под воздействием входных сигналов. Триггер является базовым элементом последовательностных логических устройств.

Рассмотрим классификацию триггеров.

По способу приема информации триггеры бывают:

асинхронные;

синхронные.

Асинхронный триггер изменяет свое состояние непосредственно в момент появления соответствующего информационного сигнала.

Синхронные триггеры реагируют на информационные сигналы только при наличии соответствующего сигнала на входе синхронизации  $C$  (строб).

Синхронные триггеры в свою очередь подразделяют на триггеры со статическим (статические) и динамическим (динамические) управлением по входу синхронизации  $C$ . Статические триггеры воспринимают информационные сигналы при подаче на вход  $C$  логической единицы (прямой вход) или логического нуля (инверсный вход). Динамические триггеры воспринимают информационные сигналы при изменении (перепаде) сигнала на входе  $C$  от 0 к 1 (прямой динамический  $C$  - вход) или от 1 к 0 (инверсный динамический  $C$ -вход).

Для прямого динамического  $C$  - входа используют обозначения, приведенные на рисунке 5.16,  $a$ , а для инверсного динамического  $C$  - входа используют обозначения, приведенные на рисунке 5.16,  $b$ .

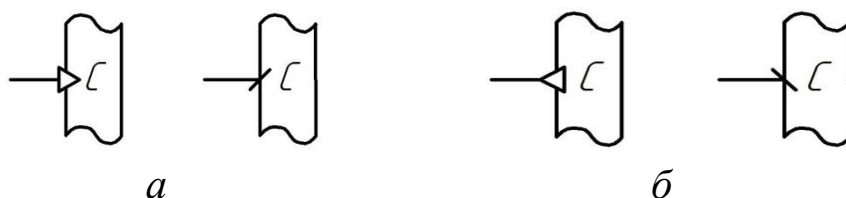


Рисунок 5.16 Условное обозначение динамического  $C$  – входа:

$a$  – прямого;  $b$  - инверсного

По функциональным возможностям триггеры разделяются на следующие классы:

с раздельной установкой состояния 0 и 1 ( $RS$  – триггеры);

универсальные ( $JK$  – триггеры);

с приемом информации по одному входу  $D$  ( $D$  – триггеры, или триггеры задержки);

со счетным входом  $T$  ( $T$ -триггеры).

Входы триггеров обычно обозначают следующим образом:

$S$  – вход для установки состояния «1»;

$R$  – вход для установки состояния «0»;

$J$  – вход для установки в состояние «1» в универсальном триггере;

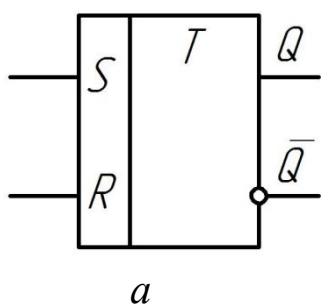
$K$  – вход для установки в состояние «0» в универсальном триггере;

$T$  – счетный (общий) вход;

$D$  – вход для установки в состояние «1» или в состояние «0»;

$V$  – дополнительный управляющий вход для разрешения приема информации (иногда используют букву  $E$  вместо  $V$ ).

Рассмотрим асинхронный  $RS$ -триггер, имеющий условное графическое обозначение, приведенное на рисунке 5.17, *а*. Триггер имеет два информационных входа:  $S$  и  $R$ . Закон функционирования триггеров удобно описывать таблицей переходов (таблицей истинности) (рисунок 5.17, *б*).



$S^t$	$R^t$	$Q^{t+1}$	Режим
0	0	$Q^t$	Хранение
1	0	1	Установка 1
0	1	0	Установка 0
1	1	-	Неопределённость

б

Рисунок 5.17  $RS$ -триггер: *а* – условное обозначение;

*б* – таблица истинности

Через  $S^t$ ,  $R^t$ ,  $Q^t$  обозначены соответствующие логические сигналы, имеющие место в некоторый момент времени  $t$ , а через  $Q^{t+1}$  – выходной сигнал в следующий момент времени  $t+1$ .

Комбинацию входных сигналов  $S^t = 1, R^t = 1$  часто называют запрещенной, так как после нее триггер оказывается в состоянии (1 или 0), предсказать которое заранее невозможно. Подобных ситуаций следует избегать.

Рассмотренный триггер может быть реализован на двух элементах ИЛИ-НЕ (рисунок 5.18). Данная схема функционирует в соответствии с приведенной на рисунке 5.17 таблицей переходов.

Микросхема К564ТР2 содержит 4 асинхронных  $RS$ -триггера и один управляющий вход (рисунок 5.19). При подаче на вход  $V$  низкого уровня выходы триггеров отключаются от выводов микросхем и переходят в третье, так называемое высокоимпедансное, состояние. При подаче на вход  $V$  логического сигнала «1» триггеры работают в соответствии с таблицей истинности (рисунок 5.17, б).

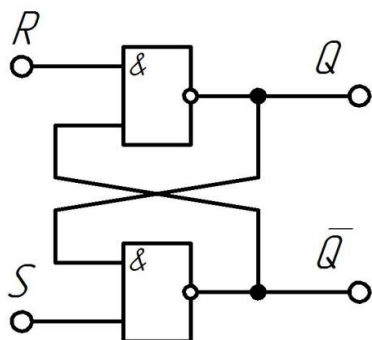


Рисунок 5.18 Триггер на элементах ИЛИ-НЕ

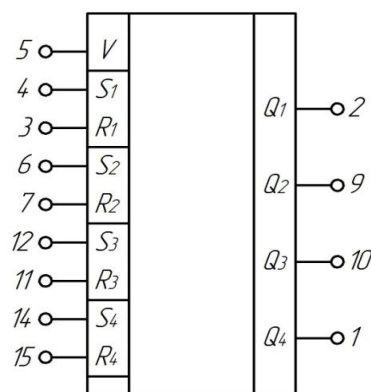
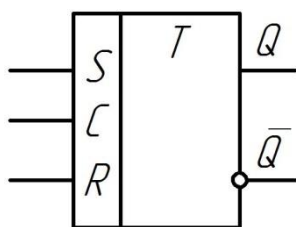
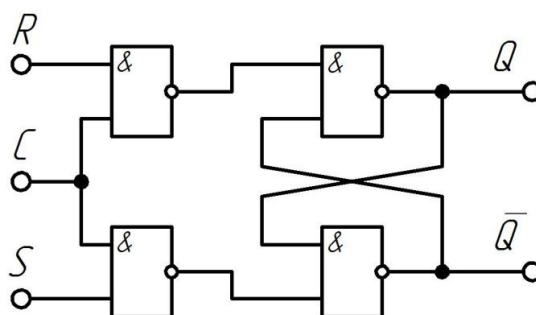


Рисунок 5.19 Микросхема К564ТР2

Рассмотрим синхронный  $RS$  –триггер на элементах И-НЕ, схема которого приведена на рисунке 3.20.



а



б

Рисунок 5.20 Синхронный  $RS$  –триггер: а - условное обозначение; б - схема

Если на входе  $C$  (синхронизации) — логический «0», то и на выходе верхнего и на выходе нижнего входного элемента И-НЕ будет логическая «1». А это, как отмечалось выше, обеспечивает хранение информации. Таким образом, если на входе  $C$  — логический «0», то воздействие на входы  $R, S$  не приводит к изменению состояния триггера. Если же на вход синхронизации  $C$  подана логическая единица, то схема реагирует на входные сигналы точно так же, как и схеме асинхронного  $RS$ –триггера на двух элементах ИЛИ-НЕ.

Рассмотрим двухступенчатый  $JK$ -триггер, условное графическое обозначение которого приведено на рисунке 5.21.

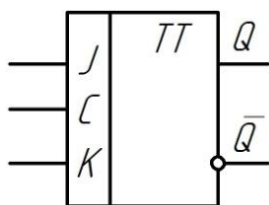


Рисунок 5.21 Условное графическое обозначение двухступенчатого  $JK$  -триггера.

Он отличается от рассмотренного  $RS$  -триггера тем, что появление на обоих информационных входах ( $J$  и  $K$ ) логических единиц (для прямых входов) приводит к изменению состояния триггера. Такая комбинация сигналов для  $JK$ -триггера не является запрещенной. В остальном  $JK$  –триггер подобен  $RS$  -триггеру, причем роль входа  $S$  играет вход  $J$ , а роль входа  $R$  — вход  $K$ . Таблица истинности  $JK$ -триггера аналогично таблице истинности  $RS$ -триггера, но не имеет неопределенных состояний.

Рассмотрим  $D$ -триггер, повторяющий на своем выходе состояние входа, условное обозначение которого приведено на рисунке 5.22.

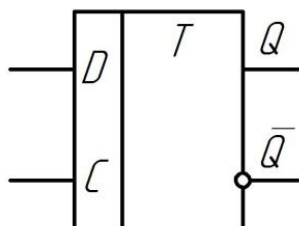


Рисунок 5.22 Условное обозначение  $D$ -триггера

Хранение информации в  $D$ -триггерах обеспечивается за счет синхронизации, поэтому все реальные  $D$ -триггеры имеют два входа: информационный  $D$  и синхронизации  $C$ . В этом триггере сигнал на входе по сигналу синхронизации записывается и передается на выход. Информация на выходе остается неизменной до прихода очередного импульса синхронизации, поэтому  $D$ -триггер называют также триггером с запоминанием информации или триггером-защелкой.

Счетчик импульсов – это последовательностное цифровое устройство, обеспечивающее хранение слова информации и выполнение над ним микрооперации счета, заключающейся в изменении значения числа в счетчике на «1». Счетчики обозначаются через СТ. Основной параметр счетчика – модуль счета (максимальное число единичных сигналов, которое может быть сосчитано счетчиком).

Рассмотрим суммирующий счетчик, построенный на четырех  $JK$ -триггерах (рисунок 5.23).

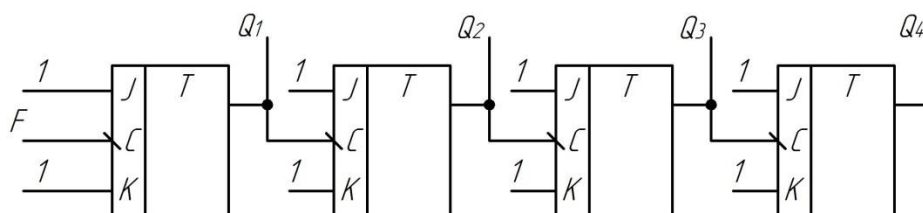


Рисунок 5.23 Суммирующий счетчик

$JK$ -триггеры переключаются в моменты появления на инверсных динамических  $C$ -входах отрицательных перепадов напряжения при наличии на обоих входах логического сигнала «1».

Временные диаграммы, иллюстрирующие работу счетчика, приведены на рисунке 5.24.

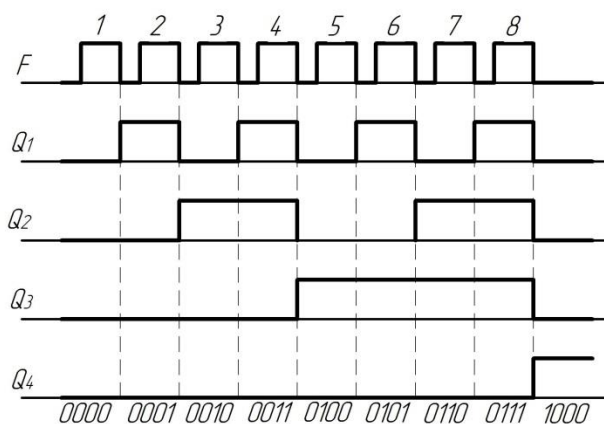


Рисунок 5.24 Диаграммы работы счетчика импульсов

На рисунке через  $K_{Cu}$  обозначен модуль счета (коэффициент счета импульсов). Состояние левого триггера соответствует младшему разряду двоичного числа, а правого – старшему разряду. В исходном состоянии на всех триггерах установлены логические нули. Каждый триггер меняет свое состояние лишь в тот момент, когда на него действует отрицательный перепад напряжения. Таким образом, данный счетчик реализует суммирование входных импульсов. Из временных диаграмм видно, что частота каждого последующего импульса в два раза меньше, чем предыдущая, т.е. каждый триггер делит частоту входного сигнала на два, что и используется в делителях частоты.

Регистр – это последовательностное логическое устройство, используемое для хранения  $n$ -разрядных двоичных чисел и выполнения преобразований над ними. Регистр представляет собой упорядоченную последовательность триггеров, число которых соответствует числу разрядов в слове. С каждым регистром обычно связано комбинационное цифровое устройство, с помощью которого обеспечивается выполнение некоторых операций над словами.

Рассмотрим накопительный регистр с параллельным вводом и выводом информации, схема которого представлена на рисунке 5.25.

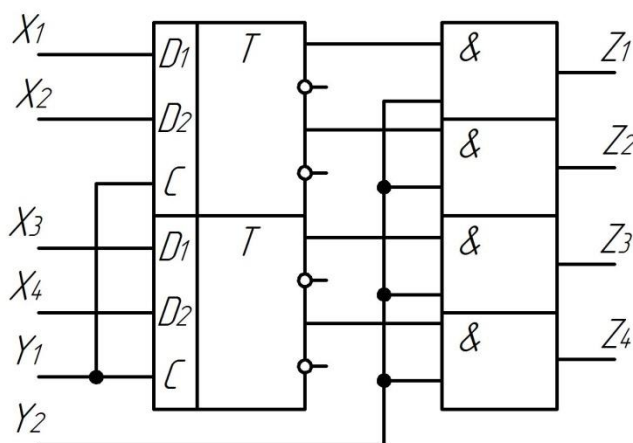


Рисунок 5.25 Схема накопительного регистра

Основой регистра являются  $D$ -триггеры, которые на своих выходах повторяют значения сигналов на информационных входах  $X_1...X_4$  при логическом сигнале «1» на входе синхронизации ( $Y_1=1$ ), т.е. в данном случае осуществляется параллельный ввод входной информации в регистр.

На четырех двухвходовых элементах «И» реализованы схемы совпадения, входные сигналы которых совпадают с выходными сигналами триггеров в том случае, когда на вход  $Y_2$  подана логическая единица. В данном случае производится параллельный вывод информации. При логическом сигнале «0» на входах синхронизации ( $Y_1=Y_2=0$ ) осуществляется хранение информации в регистрах.

## 5.4 Цифровые запоминающие устройства

Цифровыми запоминающими называют устройства, предназначенные для записи, хранения и считывания информации, представленной в цифровом коде.

По назначению запоминающие устройства (ЗУ) подразделяют на оперативные запоминающие устройства (ОЗУ) и постоянные запоминающие устройства (ПЗУ). ОЗУ обеспечивают режим записи, хранения и считывания информации в процессе ее обработки. ПЗУ в рабочем режиме допускает только хранение и считывание информации.

К основным параметрам ЗУ относятся:

- 1) информационная емкость – число ячеек памяти ЗУ;
- 2) потребляемая мощность;
- 3) время хранения информации;
- 4) быстродействие - промежуток времени, необходимый для записи и считывания информации.

Основой любого ЗУ является матрица памяти (накопитель), которая состоит из  $n$  строк. Каждая строка имеет  $m$  ячеек памяти, образующих  $m$ -разрядное слово.

Оперативные запоминающие устройства подразделяются на статические и динамические. В статических ОЗУ запоминающая ячейка представляет собой триггер на биполярных или полевых транзисторах, что определяет потенциальный характер управляющих сигналов и возможность считывания информации без ее разрушения.

ОЗУ динамического типа позволяют реализовать большой объем памяти, но они сложнее в использовании, так как необходимо наличие специальной схемы управления режимами работы. В современных динамических ОЗУ имеются встроенные системы регенерации и синхронизации. Такие ОЗУ по внешним сигналам управления не отличаются от статических ОЗУ.

Рассмотрим наиболее характерные структуры запоминающих устройств, к числу которых относятся ЗУ с одномерной адресацией (структура 2D).

Структура ЗУ с одномерной адресацией представляет собой матрицу (рисунок 5.26), число строк которой соответствует числу хранимых слов  $n$ , а число столбцов — их разрядности  $m$ .

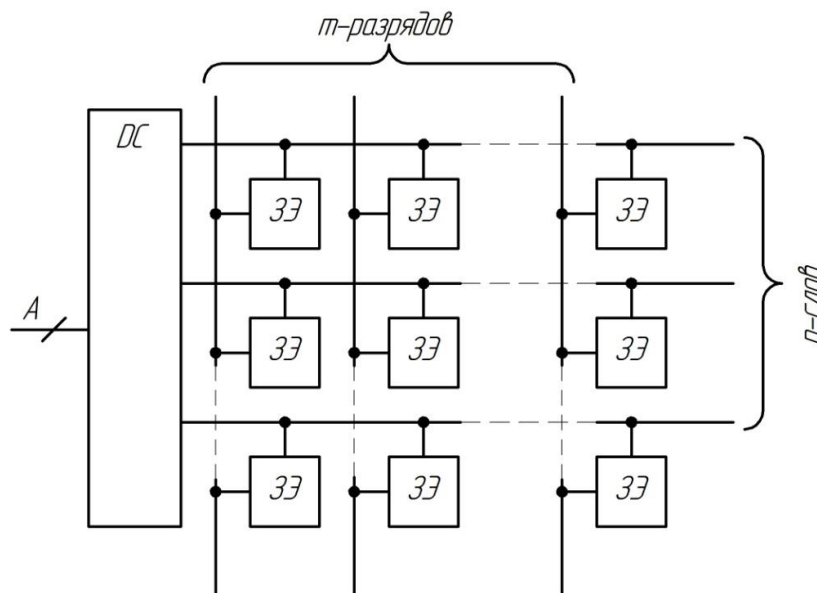


Рисунок 5.26 Структура ЗУ с одномерной адресацией

Дешифратор DC служит для выбора того или иного слова, разрешая доступ ко всем запоминающим элементам (ЗЭ) выбранной строки. Далее в зависимости от режима работы ЗУ осуществляется либо считывание информации из ячеек выбранной строки, либо запись информации в ячейки выбранной строки. Рассмотренную структуру по-другому называют структурой 2D. Основным недостатком такой структуры является значительное увеличение количества выходов дешифратора при наращивании объема памяти.

Так, для ЗУ с организацией  $4 \times 4$  требуется дешифратор с четырьмя выходами, а для ЗУ с организацией  $256 \times 4$  требуется дешифратор, имеющий 256 выходов, что сильно усложняет аппаратную реализацию.

Избежать этого можно, если использовать матрицу, длина строки которой многократно превышает разрядность хранимых слов. Это ведет к уменьшению числа строк матрицы, а, следовательно, к уменьшению числа выходов дешифратора. Из выбранной строки мат-

рицы затем выбирается ее часть, соответствующая тому или иному слову.

Структура такого ЗУ (структура  $2DM$ ) представлена на рисунке 5.27. Она содержит дешифратор для выбора строки матрицы и мультиплексоры для выбора разрядов слова.

Длина строки равна  $m \cdot 2^l$ , где  $m$  — разрядность хранимых слов. Адресный код для выбора того или иного слова в ЗУ содержит  $(k + l)$  разрядов. Часть их  $k$  используется для выбора строки матрицы из  $2^k$  строк, а другая часть  $l$  используется для выбора нужного слова в данной строке.

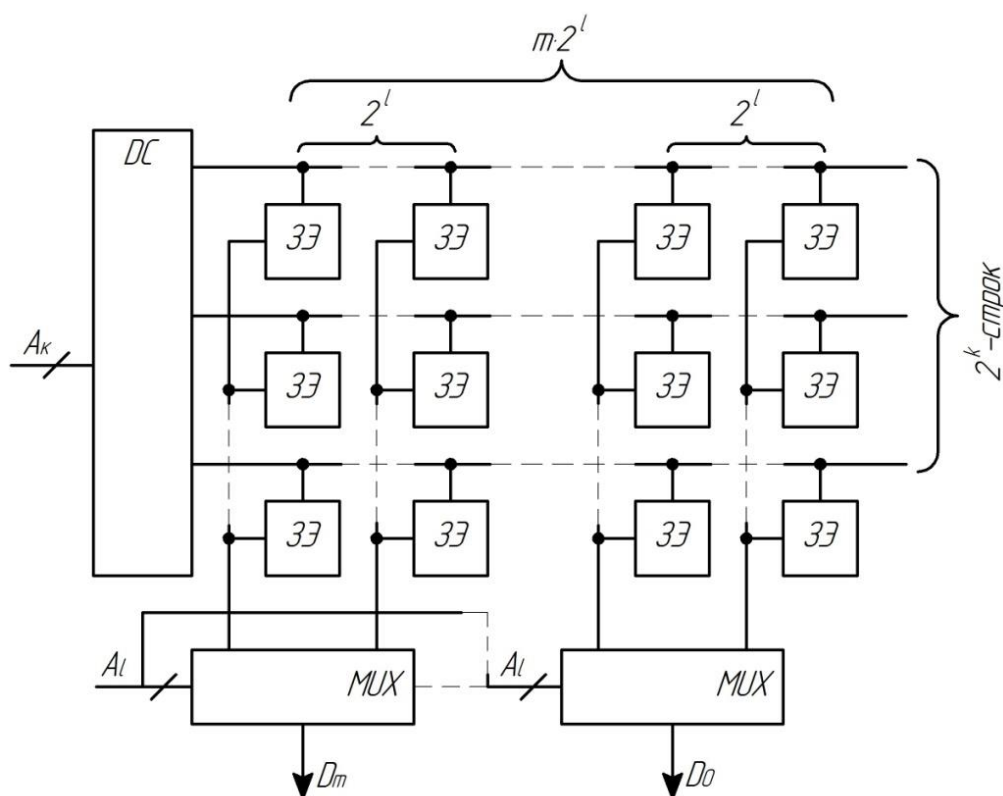


Рисунок 5.27 Структура ЗУ  $2DM$

На выходах  $m$  мультиплексоров формируется выходное слово, каждый разряд которого выбирается из отрезка длиной  $2^l$ .

Так, для ЗУ с организацией  $256 \times 4$  согласно описанному принципу можно использовать матрицу размером  $32 \times 32$  элемента, для доступа к каждому запоминающему элементу которого необходимо восьмиразрядное адресное слово. Пять разрядов этого слова, поступающая на дешифратор адреса, выбирают одну из 32 строк матрицы. Три другие разряда адресного слова, поступающая на адресные входы четырех

мультиплексоров, выбирают из отрезков длиной  $2^l = 8$  разрядов один бит каждого слова.

## 5.5 Устройства аналого-цифрового преобразования сигналов

### 5.5.1 Цифроаналоговые преобразователи

Цифроаналоговые преобразователи (ЦАП) – это устройства, предназначенные для преобразования цифровых сигналов в аналоговые. Такое преобразование необходимо, например, при восстановлении аналогового сигнала, предварительно преобразованного в цифровой для передачи на большие расстояния или хранения (таким сигналов, в частности, может быть звук).

Цифроаналоговые преобразователи применяются в системах передачи данных, измерительных приборах, компьютерах, радиолокационной технике и т.д.

Рассмотрим схему ЦАП с суммированием весовых коэффициентов, схема которого приведена на рисунке 5.28.

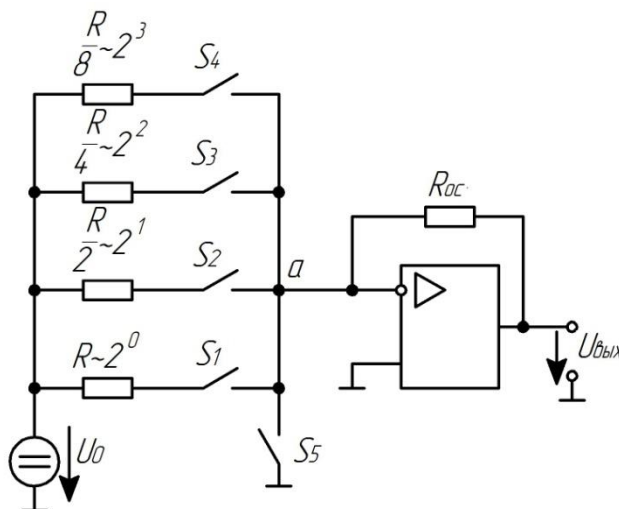


Рисунок 5.28 Схема ЦАП с суммированием весовых коэффициентов

Ключ  $S_5$  замкнут только тогда, когда разомкнуты все ключи  $S_1...S_4$ . При этом выходное напряжение  $U_{вых}=0$ ,  $U_0$  – опорное напряжение. Каждый резистор во входной цепи соответствует определенному разряду двоичного числа. По существу этот ЦАП – инвертирующий усилитель на основе операционного усилителя. Если замкнут один ключ  $S_1$ , то, что соответствует единице в первом и нулям в

остальных разрядах. Модуль выходного напряжения пропорционален числу, двоичный код которого определяется состоянием ключей  $S_1...S_4$ . Токи ключей  $S_1...S_4$  суммируются в точке «а» причем токи различных ключей различны (имеют разный «вес»). Это и определяет название схемы.

Из вышеизложенного следует, что

$$u_{\text{вых}} = -U_0 \frac{R_{oc}}{R} \cdot S_1 - U_0 \frac{R_{oc}}{R/2} \cdot S_2 - U_0 \frac{R_{oc}}{R/4} \cdot S_3 - U_0 \frac{R_{oc}}{R/8} \cdot S_4$$

$$\text{или } u_{\text{вых}} = -U_0 \frac{R_{oc}}{R} \cdot (S_1 + 2S_2 + 4S_3 + 8S_4).$$

$S_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) принимает значение «1», если соответствующий ключ замкнут, и «0», если ключ разомкнут.

Если замкнут только ключ  $S_1$ , то выходное напряжение определяется выражением

$$u_{\text{вых}} = -U_0 \frac{R_{oc}}{R}.$$

Это соответствует «1» в первом и «0» в остальных разрядах.

Состояние ключей определяется входным преобразуемым кодом. Схема проста, но имеет недостатки: значительные изменения напряжения на ключах и использование резисторов с сильно отличающимися сопротивлениями. Требуемую точность этих сопротивлений обеспечить затруднительно.

Схема ЦАП на основе резистивной матрицы  $R - 2R$  (матрицы постоянного сопротивления) приведена на рисунке 5.29.

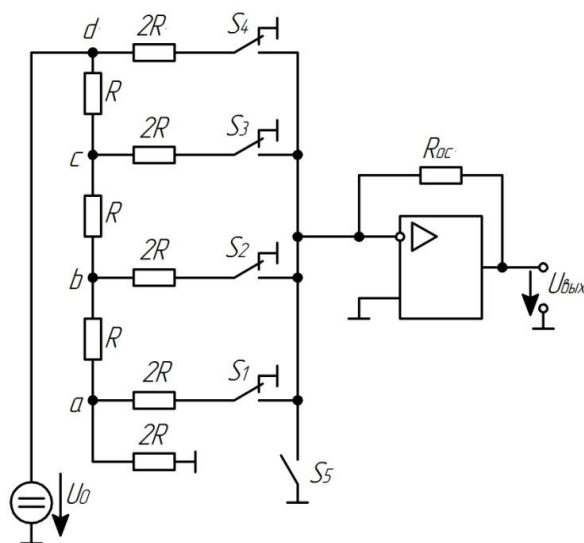


Рисунок 5.29 Схема ЦАП на основе резистивной матрицы

В схеме использованы так называемые перекидные ключи  $S_1...S_4$ , каждый из которых в одном из состояний подключен к общей точке, поэтому напряжения на ключах невелики. Ключ  $S_5$  замкнут только тогда, когда все ключи  $S_1...S_4$  подключены к общей точке. Во входной цепи использованы резисторы всего с двумя различными значениями сопротивлений ( $R$  и  $2R$ ). Тогда напряжение относительно общей точки в каждой следующей из точек «а»...«d» в 2 раза больше, чем в предыдущей, т.е.

$$U_d = U_0; U_c = \frac{U_0}{2}; U_b = \frac{U_0}{4}; U_a = \frac{U_0}{8}.$$

Допустим, что состояние указанных ключей изменилось. Тогда напряжения в точках «а»...«d» не изменится, так как напряжение между входами операционного усилителя практически нулевое.

При любом положении ключей  $S_1...S_4$  входное сопротивление матрицы всегда равно  $R$ , а ток, втекающий в матрицу от источника опорного напряжения  $U_0$  всегда равен  $I_0 = \frac{U_0}{R}$ . Далее он последовательно делится в узлах матрицы  $d, c, b, a$  по двоичному закону.

$$U_{\text{вых}} = -U_0 \frac{R_{\text{ос}}}{2R} \cdot S_4 - \frac{U_0}{2} \frac{R_{\text{ос}}}{2R} \cdot S_3 - \frac{U_0}{4} \frac{R_{\text{ос}}}{2R} \cdot S_2 - \frac{U_0}{8} \frac{R_{\text{ос}}}{2R} \cdot S_1.$$

После преобразований получаем

$$U_{\text{вых}} = -U_0 \frac{R_{\text{ос}}}{16R} \cdot (S_1 + 2S_2 + 4S_3 + 4S_4),$$

где  $S_i$  ( $i = \overline{1,4}$ ) принимает значение «1», если соответствующий ключ замкнут, и «0», если ключ разомкнут.

### 5.5.2 Аналого-цифровые преобразователи

Аналого-цифровые преобразователи (АЦП) – это устройства, предназначенные для преобразования аналоговых сигналов в цифровые.

Цифровой сигнал на выходе АЦП состоит из определенного количества бит, которые соответствуют величине входного аналогового сигнала.

Аналого-цифровое преобразование используется в различных измерительных системах, в устройствах генерации и обработки сигналов, в компьютерных системах для хранения и обработки цифровых сигналов в соответствии с определенной программой и т.д.

Процесс аналого-цифрового преобразования обычно более сложный, чем цифроаналоговое преобразование, и занимает больше времени.

Для преобразования аналогового сигнала в цифровой необходимо осуществить три операции: дискретизацию, квантование и кодирование.

Дискретизация представляет собой преобразование непрерывного (аналогового) сигнала  $x(t)$  в последовательность отдельных его значений  $x(t_i)$ , соответствующих некоторым фиксированным моментам времени  $t_i$ .

Дискретизация аналогового сигнала может осуществляться с постоянным периодом дискретизации (равномерная дискретизация) или с переменным периодом дискретизации (адаптивная дискретизация). В подавляющем большинстве случаев используется равномерная дискретизация.

Характеристика идеального квантования имеет вид, приведенный на рисунке 5.30.

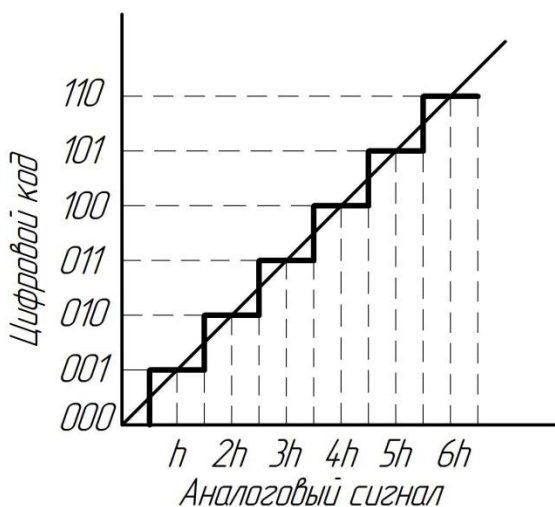


Рисунок 5.30 Квантование аналогового сигнала

После дискретизации аналогового сигнала осуществляют его квантование и кодирование.

Квантование представляет собой округление аналоговой величины до ближайшего уровня квантования, т.е. максимальная погрешность квантования равна  $\pm 0,5h$ , где  $h$  – шаг квантования.

При квантовании каждому значению дискретизированного аналогового сигнала ставится в соответствие определенный уровень квантования. Уровни квантования образуются путем разбиения всего

диапазона изменения аналогового сигнала на ряд участков, каждому из которых присваивается определенный номер.

Далее каждому номеру квантования ставится в соответствие определенный цифровой код, т.е. проводится кодирование сигнала.

По способу осуществления операций дискретизации, квантования и кодирования бывают параллельные, последовательные и последовательно-параллельные АЦП.

Рассмотрим принцип действия АЦП с параллельным преобразованием входного аналогового сигнала, схема которого представлена на рисунке 5.31.

В АЦП с параллельным преобразованием входное напряжение одновременно сравнивается с  $n$  опорными напряжениями и определяется, между какими двумя опорными напряжениями оно лежит. При этом результат получают быстро, но схема оказывается достаточно сложной.

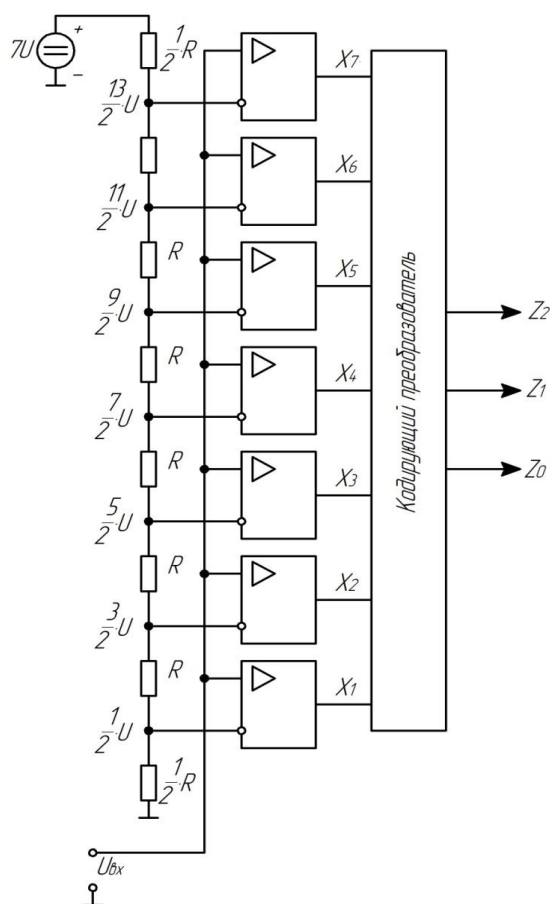


Рисунок 5.31 Схема АЦП с параллельным преобразованием входного сигнала

При входном напряжении  $U_{вх} = 0$  для всех ОУ разность напряжений ( $U_+ - U_-$ )  $< 0$  ( $U_+$ ,  $U_-$  — напряжения относительно общей

точки неинвертирующего и инвертирующего входов, соответственно), напряжения на выходе всех ОУ равны  $-E_{\text{п}}$ , а на выходах кодирующего преобразователя (КП)  $Z_0, Z_1, Z_2$  устанавливаются нули.

Если  $U_{\text{вх}}$  больше  $1/2 \cdot U$ , но меньше  $3/2 \cdot U$ , то только для нижнего ОУ ( $U_+ - U_-$ )  $> 0$  и лишь на его выходе появляется напряжение  $+E_{\text{п}}$ , что приводит к появлению на выходах КП следующих сигналов:  $Z_0 = 1, Z_1 = Z_2 = 0$  (код 001).

Если  $U_{\text{вх}}$  больше  $3/2 \cdot U$ , но меньше  $5/2 \cdot U$ , то на выходе двух нижних ОУ появляется напряжение  $+E_{\text{п}}$ , что приводит к появлению на выходах кодирующего преобразователя (КП) кода 010, и т.д.

В АЦП с параллельным преобразованием входной сигнал за время преобразования существенно не изменяется. Они являются АЦП мгновенных значений напряжения. Для синхронизации моментов формирования выходного кода компараторы обычно делают стробируемыми. Параллельные АЦП являются самыми быстродействующими и способны работать на частотах дискретизации до 20 МГц и выше. Однако с увеличением числа разрядов уровней квантования на единицу удваивается число компараторов, и схема получается громоздкой. Несмотря на это обстоятельство, такие преобразователи широко используются при построении последовательно-параллельных АЦП.

Рассмотрим конкретный вариант АЦП с последовательным преобразованием входного сигнала (последовательного счета), схема которого показана на рисунке 5.32.

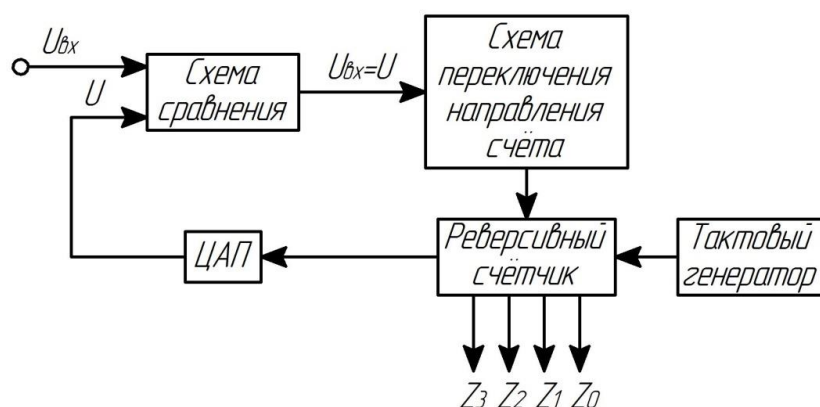


Рисунок 5.32 Схема АЦП с последовательным преобразованием входного сигнала

По-другому их называют АЦП со следящей связью. В АЦП рассматриваемого типа используется ЦАП и реверсивный счетчик, сигнал которого обеспечивает изменение напряжения на выходе ЦАП.

Настройка схемы такова, что обеспечивается примерное равенство напряжений на входе  $U_{вх}$  и на выходе ЦАП  $-U$ . Если входное напряжение  $U_{вх}$  больше напряжения  $U$  на выходе ЦАП, то счетчик переводится в режим прямого отсчета и код на его выходе увеличивается, обеспечивая увеличение напряжения на выходе ЦАП. В момент равенства  $U_{вх}$  и  $U$  счет прекращается и с выхода реверсивного счетчика снимается код, соответствующий входному напряжению. Такой преобразователь является интегрирующим, так как преобразует не мгновенные, а средние значения входных напряжений за время преобразования.

### Вопросы для самоконтроля

- 1) Какие устройства называются цифровыми?
- 2) Какая логика называется позитивной, а какая – отрицательной?
- 3) Что называется таблицей истинности?
- 4) Что называется логической функцией?
- 5) Условное обозначение, таблица истинности и логическая функция операции НЕ.
- 6) Условное обозначение, таблица истинности и логическая функция операции ИЛИ.
- 7) Условное обозначение, таблица истинности и логическая функция операции И.
- 8) Сформулируйте переместительный закон алгебры логики?
- 9) Сформулируйте распределительный закон алгебры логики?
- 10) Сформулируйте сочетательный закон алгебры логики?
- 11) Какие цифровые устройства комбинационными?
- 12) Условное обозначение и таблица истинности шифратора.
- 13) Какой шифратор называется полным, а какой – неполным?
- 14) Условное обозначение и таблица истинности дешифратора.
- 15) Условное обозначение и таблица истинности мультиплексора.
- 16) Условное обозначение и таблица истинности демультиплексора.
- 17) Какое устройство называется полусумматором?

- 18) Условное обозначение и таблица истинности сумматора.
- 19) Какое цифровое устройство называется последовательностным?
- 20) Что называется триггером?
- 21) Как классифицируются триггеры по способу приема информации?
- 22) Условное обозначение и таблица истинности асинхронного и синхронного RS - триггера.
- 23) Какое устройство называется счетчиком импульсов?
- 24) Что называется регистром?
- 25) Какие устройства называются цифровыми запоминающими устройствами?
- 26) Какие устройства называются цифроаналоговыми преобразователями?
- 27) Какие устройства называются аналого-цифровыми преобразователями?

## **6 МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ УСТРОЙСТВА**

### **6.1 Назначение, классификация и функции микропроцессоров**

Микропроцессором (МП) называется устройство, осуществляющее обработку цифровой информации в соответствии с заданной программой.

Первые микропроцессоры появились в 1970-х годах и применялись в электронных калькуляторах. В них использовалась двоично-десятичная арифметика 4-битных слов. Уменьшение стоимости, потребляемой мощности и габаритных размеров, повышение надежности и производительности микропроцессоров способствовали значительному расширению сферы их использования. Вскоре их стали встраивать и в другие устройства, например, терминалы, принтеры и различные устройства автоматики.

В отличие от процессора, который реализован в виде электрической схемы на элементной базе общего назначения или в виде программной модели, микропроцессор реализуется на одной или нескольких микросхемах.

В настоящее время, в связи с очень незначительным распространением процессоров, в бытовой лексике термины «микропроцессор» и «процессор» равнозначны.

По назначению они подразделяются на универсальные и специализированные. Универсальными называются МП, в системе команд которых заложена алгоритмическая универсальность. Это значит, что выполняемый микропроцессором состав команд позволяет получить преобразование информации в соответствии с любым заданным алгоритмом. Специализированными называют МП, предназначенные для решения определенного класса задач, а иногда для решения только одной задачи. Их особенностью является простота управления, компактность аппаратных средств, низкая стоимость и малая мощность потребления.

По количеству выполняемых программ различают однопрограммные и многопрограммные микропроцессоры. В однопрограммных микропроцессорах выполняется только одна программа. Переход к выполнению другой программы происходит после завершения текущей программы. В многопрограммных микропроцессорах одновременно выполняется несколько (несколько десятков) программ.

По характеру временной организации МП делят на синхронные и асинхронные. Синхронными называются МП, в которых начало и конец выполнения операции задаются устройством управления. Время выполнения операции в этом случае не зависит от вида выполняемых команд. Асинхронные МП позволяют начало выполнения каждой следующей операции определить по сигналу фактического окончания выполнения предыдущей операции. Закончив работу над какой-либо операцией, устройство вырабатывает сигнал запроса, означающий его готовность к выполнению операции. При этом роль естественного распределителя работ принимает на себя память, которая в соответствии с заранее установленными приоритетом выполняет запросы остальных устройств по обеспечению их командной информацией и данными.

По организационной структуре различают МП одномагистральные и многомагистральные. Это позволяет осуществить одновременную передачу информационных сигналов по нескольким магистралям. Такая организация МП усложняет их конструкцию, однако увеличивает производительность.

Рассмотрим основные параметры микропроцессора.

Тактовая частота – это максимальное число переключений элементов МП.

Разрядность – максимальное число одновременно обрабатываемых двоичных разрядов. Разрядность МП обозначается  $m/n/k$  и включает:

$m$  – разрядность внутренних регистров, определяющих принадлежность к тому или иному классу процессоров;

$n$  – разрядность шины данных, которая определяет скорость передачи информации;

$k$  – разрядность шины адреса, которая определяет размер адресного пространства.

Например, микропроцессор *i8088* характеризуется параметрами 16/8/20, т.е.  $m=16$ ,  $n=8$ ,  $k=20$ .

Микропроцессор выполняет следующие функции:

- 1) чтение и дешифрацию команд из основной памяти;
- 2) чтение данных из основной памяти и регистров адаптеров внешних устройств;
- 3) прием и обработку запросов и команд от адаптеров на обслуживание внешних устройств;

4) обработку данных и их запись в основную память и регистры адаптеров внешних устройств.

Основные идеи создания процессора сформулировал Ч. Бебидж (1791—1871). Предложенная им укрупненная блок-схема процессора, которая представлена на рисунке 6.1, сохранилась до настоящего времени.

Процессор состоит из арифметическо-логического устройства (АЛУ) и устройства управления (УУ) действиями над числами, которое реализует АЛУ.

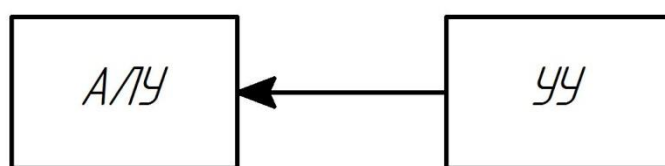


Рисунок 6.1 Укрупненная блок-схема процессора

В современных микропроцессорах, реализованных на интегральных микросхемах, используется двоичная арифметика, в которой число представляется как сумма степеней числа 2, умноженных на соответствующее число:

$$N = a_1 \cdot 2^0 + a_2 \cdot 2^1 + \dots + a_{n+1} \cdot 2^n,$$

где каждый разряд двоичного числа  $a_1, \dots, a_{n+1}$  может принимать только значения «0» или «1». При использовании такой системы в микропроцессоре цифра «0» воспроизводится низким уровнем напряжения, цифра «1» — высоким уровнем напряжения.

Любая цифра двоичного числа называется битом (bit). Восемь разрядов такого числа — байтом (byte).

## 6.2 Структура и принцип работы микропроцессорного устройства

Микропроцессорное устройство (МПУ) — это программно-управляемое устройство, предназначенное для обработки цифровой информации, управляющее этим процессом и выполненное в виде одной или нескольких интегральных микросхем.

Упрощенная структурная схема микропроцессорного устройства приведена на рисунке 6.2.

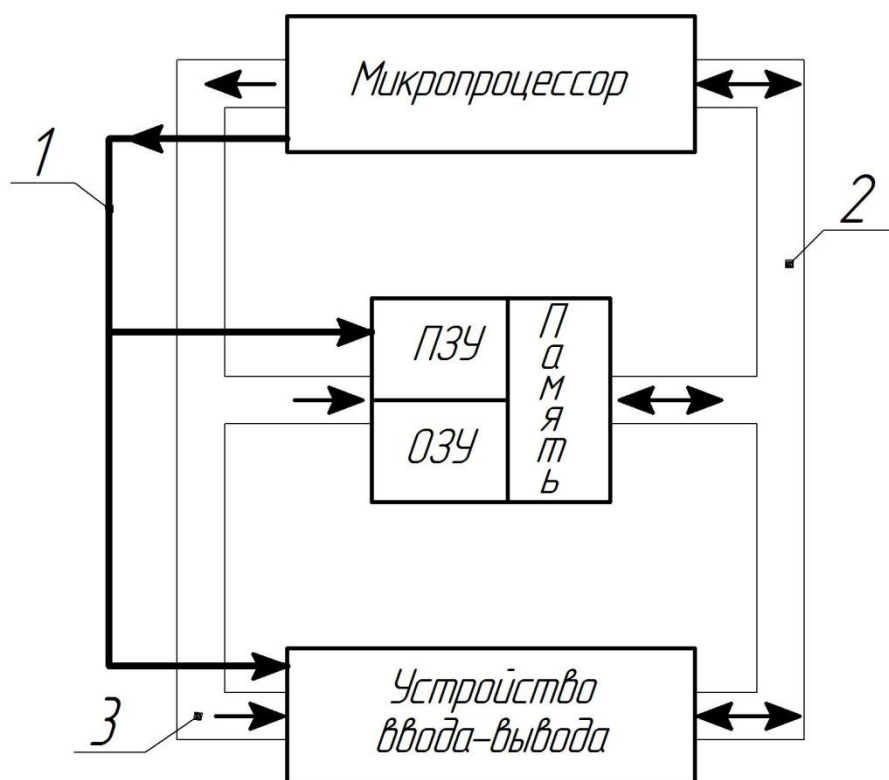


Рисунок 6.2 Структурная схема микропроцессорного устройства: 1 –шина управления; 2- шина данных; 3 – шина адреса

Она содержит:

- микропроцессор;
- запоминающее устройство (ЗУ), или память, которая состоит из постоянного запоминающего устройства (ПЗУ) и оперативного запоминающего устройства (ОЗУ);
- устройства ввода-вывода (УВВ), обеспечивающего вычислительный процесс и связь с оператором (монитор, клавиатура, внешние запоминающие устройства и т. д.);
- шины для подключения узлов МП.

ПЗУ обеспечивает хранение неизменяемых программ работы системы. Если это универсальная система типа персонального компьютера, то в ПЗУ хранится программа базовой системы ввода-вывода, обеспечивающая функционирование и начальную загрузку системы — инициализацию. Если это специализированная система, типа устройства числового программного управления, то в ПЗУ заносятся все программное обеспечение системы. ОЗУ предназначено для хранения информации, которая может изменяться в процессе работы системы. Это могут быть данные, промежуточные результаты вычислений и программы, исполняемые в текущий момент времени. В про-

стных системах это только входная информация и промежуточные результаты.

Устройство ввода-вывода содержит в себе интерфейс (связующее звено), служащий для преобразования сигналов от микропроцессора в сигналы, доступные периферийным устройствам, и наоборот. Интерфейс обеспечивает необходимое согласование (сопряжение) устройств по входным и выходным сигналам по форме представления сигналов (аналоговой, цифровой) и последовательности их прохождения.

Структура любой микропроцессорной системы является магистрально-модульной. Это означает, что в ней можно выделить набор модулей - устройств, подключенных к общим магистралям, называемым шинами. Под шиной понимают набор линий связи, по которым передается информация определенного типа и осуществляется обмен информацией между различными модулями системы. Взаимодействие узлов МПУ между собой осуществляется с помощью трех шин: шины адреса (ША), шины данных (ШД) и шины управления (ШУ).

Устройство управления МП вырабатывает серию импульсов, обеспечивающих последовательное и слаженное срабатывание узлов микропроцессора в соответствии с выполняемой командой. Для выработки управляющих импульсов на его вход поступают импульсы синхронизации от внешнего генератора. Такой генератор может быть также встроен и в устройство управления. Кроме управления внутренними узлами устройство управления обеспечивает прием и выдачу внешних управляющих сигналов.

Устройство управления координирует работу всех устройств системы с помощью шины управления. Она состоит из отдельных линий, по которым передаются те или иные управляющие сигналы. В основном это сигналы, передаваемые из микропроцессора в остальные узлы, но некоторые имеют обратную направленность — в микропроцессор. Примером первых могут служить сигналы чтения и записи, указывающие, какую именно следует выполнять операцию с ячейкой, адрес которой выставлен на шине адреса. Ко вторым относятся осведомительные сигналы запроса обслуживания, поступающие от внешних устройств, а также сигнал сброса микропроцессора в начальное (нулевое) состояние.

Передача данных из выбранной ячейки памяти или портов устройства ввода-вывода осуществляется с помощью шины данных.

Чтобы микропроцессор мог однозначно выбрать нужную ячейку памяти или регистр внешнего устройства, они имеют адреса. Адрес ячейки (регистра) передается от микропроцессора в память или интерфейсный блок по шине адреса. Она однонаправленная, так как направление передачи информации по ней только одно — из микропроцессора. В отличие от нее шина данных является двунаправленной, так как передача данных по ней осуществляется как из микропроцессора в память и интерфейс, так и наоборот. Шины адреса и данных состоят из параллельных линий, передача информации по которым осуществляется одновременно для всех линий. Число линий шины данных определяется разрядностью микропроцессора, а шины адреса — объемом памяти, т.е. разрядностью двоичного кода, необходимого для адресации всех ячеек.

Арифметико-логическое устройство обеспечивает выполнение всех операций, с помощью которых осуществляется переработка данных в микропроцессоре.

Принцип работы МПУ заключается в следующем.

Выполняя программу, микропроцессор обрабатывает команду за командой, которые обычно располагаются в ячейках памяти последовательно одна за другой. Команда задает выполняемую операцию и содержит сведения, где находятся операнды. Операндами называются двоичные числа, над которыми выполняются в арифметико-логическом устройстве. Устройство управления получает из запоминающего устройства команду на выполнение операции. Микропроцессор выставляет на шине данных содержимое программного счетчика, хранящего адрес ячейки памяти с очередной командой. Содержимое ячейки выставляется на шину данных, микропроцессор считывает информацию с шины данных и помещает команду в регистр команд, который обеспечивает хранение команды в течение всего цикла её исполнения.

Далее проводится собственно выполнение команды. При этом сначала микропроцессор должен подготовить операнды. Операнды могут храниться как в самом микропроцессоре, так и в оперативном запоминающем устройстве. В первом случае они хранятся в регистрах данных, и микропроцессор может переходить к непосредственному исполнению математической или логической операции в соответствии с кодом команды. Во втором случае микропроцессор должен сначала вычислить адрес ячейки оперативного запоминающего устройства, хранящей операнд, потом выставить этот адрес на ши-

ну адреса и считать содержимое указанной ячейки оперативного запоминающего устройства, и только затем выполнить операцию. Выполнение операции осуществляется в арифметико-логическом устройстве, после чего результат должен быть помещен на место первого операнда. Если это один из внутренних регистров микропроцессора, результат сразу же переписывается в этот регистр, если это ячейка оперативного запоминающего устройства, требуется еще один цикл обращения к памяти. Таким образом, время исполнения команды зависит от количества циклов обращения к памяти, и самыми короткими являются те команды, в которых операнды хранятся непосредственно в микропроцессоре.

Во время выполнения команды при каждом обращении микропроцессора к памяти программ содержимое программного счетчика автоматически увеличивается на единицу. Команды могут занимать не только одну ячейку памяти, а две и даже три, при этом, чтобы считать всю команду, микропроцессор должен несколько раз обратиться к памяти программ. В результате в конце выполнения команды в программном счетчике уже хранится адрес следующей, и микропроцессор готов к выполнению очередной команды.

### **6.3 Арифметико-логическое устройство**

Арифметико-логическое устройство (АЛУ) предназначено для выполнения арифметических и логических операций. Основное назначение АЛУ заключается в приеме данных, хранящихся в памяти, и осуществление над ними арифметических и логических операций под действием устройства управления.

Оно может выполнять несложные арифметические, логические и сдвиговые операции: сложение, вычитание, логические «И», «ИЛИ», «НЕ», исключающее ИЛИ, сдвиг вправо, сдвиг влево, сложение с единицей (инкремент) и вычитание единицы (декремент). Сложные арифметические операции, такие как умножение и деление, арифметико-логическое устройство не выполняет.

Количество операндов, т.е. двоичных чисел, над которыми выполняются действия в арифметико-логическом устройстве, может колебаться от одного до двух. Например, при инвертировании (логическое «НЕ») ему достаточно одного операнда, а для операции сложения двух чисел необходимо два операнда.

АЛУ содержит комбинационные логические схемы, составляющие ядро АЛУ, и как минимум два регистра, один из которых является накапливающим регистром (аккумулятором).

Поясним принцип работы АЛУ с помощью упрощенной схемы, приведенной на рисунке 6.3.

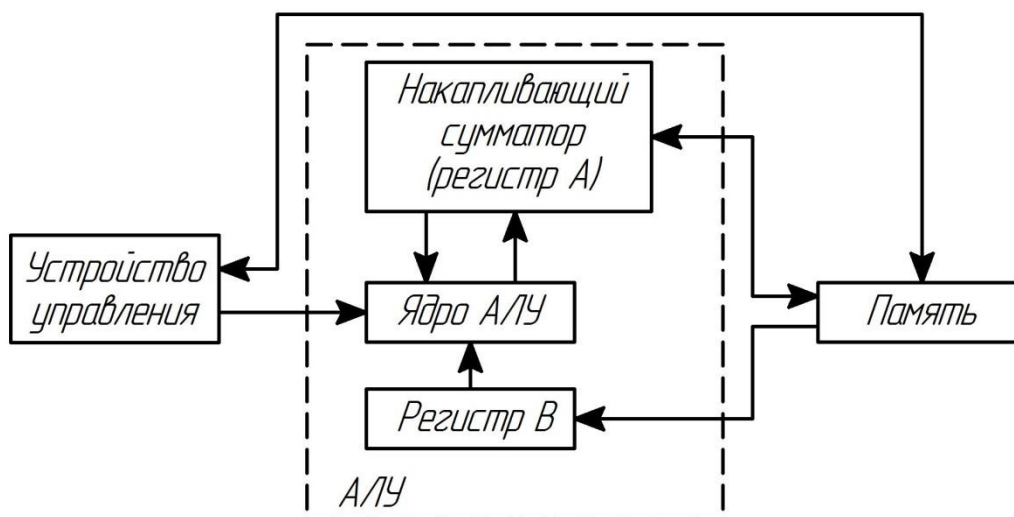


Рисунок 6.3 Упрощенная схема АЛУ

Рассмотрим, как происходит сложение числа из конкретной ячейки памяти с числом из накапливающего регистра. Устройство управления получает из запоминающего устройства команду на такую операцию. Сначала число, которое надо прибавить, передается из памяти в регистр В. Затем оно по команде из устройства управления складывается с числом из накапливающего регистра, а результат записывается в данный регистр. По завершении этого процесса результат сложения может быть передан в память или к нему, аналогичным образом может быть прибавлено новое число из памяти, и новый результат вновь будет занесен в накапливающий регистр. Таким образом, регистр А накапливает или «аккумулирует» полученные результаты и поэтому его часто называют «аккумулятором».

Очевидно, что арифметические и логические операции осуществляются в ядре АЛУ. Обычно АЛУ четырехразрядные. Они выпускаются в виде интегральных схем и при необходимости наращивания разрядности объединяются с формированием последовательных или параллельных переносов. Несмотря на различные технологии изготовления АЛУ их возможности сходны.

АЛУ выполняет над двоичными числами арифметические и логические операции, перечень которых приведен в следующей таблице 6.1.

Таблица 6.1 Перечень арифметических и логических операций, выполняемых в АЛУ

№ п/п	Состояние входов $S_j$	Логические операции ( $M = 1$ )	Арифметико-логические операции ( $M = 0$ )
1	0 0 0 0	$\bar{A}$	$A + C_0$
2	0 0 0 1	$\bar{A} \vee \bar{B}$	$A \vee B + C_0$
3	0 0 1 0	$\bar{A} \vee B$	$A \vee \bar{B} + C_0$
4	0 0 1 1	0	$1 + C_0$
5	0 1 0 0	$\bar{A} \wedge \bar{B}$	$A + A \wedge B + C_0$
6	0 1 0 1	$\bar{B}$	$A \vee B + A \wedge B + C_0$
7	0 1 1 0	$A \oplus B$	$A + B + C_0$
8	0 1 1 1	$A \vee \bar{B}$	$A \wedge B + 1 + C_0$
9	1 0 0 0	$\bar{A} \vee B$	$A + A \wedge B + C_0$
10	1 0 0 1	$\bar{A} \oplus \bar{B}$	$A + B + C_0$
11	1 0 1 0	B	$A \vee \bar{B} + A \wedge B + C_0$
12	1 0 1 1	$A \wedge B$	$A \wedge B + 1 + C_0$
13	1 1 0 0	1	$A + A + C_0$
14	1 1 0 1	$A \vee \bar{B}$	$A \vee B + A + C_0$
15	1 1 1 0	$A \vee B$	$A \vee \bar{B} + A + C_0$
16	1 1 1 1	A	$A + 1 + C_0$

В данной таблице приняты следующие обозначения: «+» — арифметическое сложение; « $\vee$ » — логическое сложение (дизъюнкция);  $\wedge$  — логическое умножение (конъюнкция);  $\oplus$  — логическая операция «исключающее ИЛИ»;

A и B — четырехразрядные входные числа (слова);  $S_j$  — разряды четырехразрядного слова S выбора операций; вход M (Mode), сигнал на котором задает тип выполняемых операций (логических при  $M = 1$  или арифметико-логических при  $M = 0$ );  $C_0$  — вход переноса (входной перенос поступает в младший разряд слова, т. е. равен 0000); под обозначениями 1 и 0 подразумевают четырехразрядные числа 1111 и 0000.

В АЛУ реализованы все 16 возможных логических операций над двумя переменными  $A$  и  $B$ . В арифметико-логических операциях встречаются одновременно и логические и арифметические операции. Следует подчеркнуть, что логические операции в АЛУ осуществляются поразрядно. При выполнении арифметических операций АЛУ представляет собой четырехразрядный сумматор с параллельным переносом.

Рассмотрим в качестве примера выполнение в АЛУ операций под номером 6, причем будем считать, что на входе переноса  $C_0$  действует сигнал логического нуля, т. е.  $C_0 = 0$ . Тогда при  $M = 1$  реализуется логическая функция  $F = \bar{B}$ , т. е. осуществляется поразрядное инвертирование входной переменной  $B$  и на четырех выходах АЛУ появляется четырехразрядный результат этой операции.

При  $M = 0$  в результате выполнения арифметико-логических операций реализуется следующая функция  $F$ :

$$F = A \vee B + A \wedge B.$$

Вначале поразрядно выполняются операции инвертирования ( $\bar{B}$ ), логического сложения ( $A \vee B$ ) и логического умножения ( $A \wedge B$ ), а затем полученные в результате логического сложения и логического умножения два четырехразрядных числа складываются арифметически. АЛУ может осуществлять сравнение двух переменных  $A$  и  $B$  на равенство и имеет соответствующий вывод  $F_{A=B}$  с открытым коллектором.

АЛУ имеет выход переноса  $C_n$ , используемый при его последовательном соединении для наращивания разрядности, а также дополнительные выходы  $G$  и  $P$ , используемые при параллельном соединении АЛУ для наращивания разрядности входных переменных.

### Вопросы для самоконтроля

- 1) Какое устройство называется микропроцессором?
- 2) Пояснить классификацию микропроцессоров?
- 3) Назвать основные параметры микропроцессоров?
- 4) Перечислить элементы микропроцессоров?
- 5) Что называется микропроцессорным устройством?
- 6) Назвать состав микропроцессорного устройства?
- 7) Для чего предназначено постоянное запоминающее устройство?
- 8) Для чего служит оперативное запоминающее устройство?

- 9) Какие элементы входят в состав устройства ввода-вывода?
- 10) Для чего предназначено арифметико-логическое устройство?
- 11) Что называется шиной микропроцессорного устройства?
- 12) Перечислить шины микропроцессорного устройства?
- 13) Пояснить принцип работы микропроцессорного устройства?

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Система обозначений диодов

Система обозначений полупроводниковых диодов установлена отраслевым стандартом 11336.919-81. В основу системы обозначений положен буквенно-цифровой код.

Первый элемент (цифра или буква) обозначает исходный полупроводниковый материал, второй (буква) – подкласс приборов, третий (цифра) – основные функциональные возможности прибора, четвертый – число, обозначающее порядковый номер разработки, пятый элемент – буква, условно определяющая классификацию (разбраковку по параметрам) приборов, изготовленных по единой технологии.

Для обозначения *исходного полупроводникового материала* используются следующие символы:

Г или 1 – германий или его соединения;

К или 2 – кремний или его соединения;

А или 3 – соединения галлия;

И или 4 – соединения индия.

Для обозначения *подклассов диодов* используется одна из следующих букв:

Д – диоды выпрямительные и импульсные;

Ц – выпрямительные столбы и блоки;

В – варикапы;

И – туннельные диоды;

А – сверхвысокочастотные диоды;

С – стабилитроны;

Г – генераторы шума;

Л – излучающие оптоэлектронные приборы;

О – оптопары.

Для обозначения наиболее характерных эксплуатационных признаков приборов (их функциональных возможностей) используются следующие цифры.

*Диоды (подкласс Д):*

1 – выпрямительные диоды с постоянным или средним значением прямого тока не более 0,3 А;

2 – выпрямительные диоды с постоянным или средним значением прямого тока более 0,3 А, но не свыше 10 А;

4 – импульсные диоды с временем восстановления обратного сопротивления более 500 нс;

5 – импульсные диоды с временем восстановления более 150 нс, но не свыше 500 нс;

6 – импульсные диоды с временем восстановления 30...150 нс;

7 – импульсные диоды с временем восстановления 5...30 нс;

8 – импульсные диоды с временем восстановления 1...5 нс;

9 – импульсные диоды с эффективным временем жизни неосновных носителей заряда менее 1 нс.

*Выпрямительные столбы и блоки (подкласс Ц):*

1 – столбы с постоянным или средним значением прямого тока не более 0,3 А;

2 – столбы с постоянным или средним значением прямого тока 0,3...10 А;

3 – блоки с постоянным или средним значением прямого тока 0,3 А;

4 – блоки с постоянным или средним значением прямого тока 0,3...10 А.

*Варикапы (подкласс В):*

1 – подстроечные варикапы;

2 – умножительные варикапы;

*Туннельные диоды (подкласс И):*

1 – усилительные туннельные диоды;

2 – генераторные туннельные диоды;

3 – переключательные туннельные диоды;

4 – обращенные диоды.

*Сверхвысокочастотные диоды (подкласс А):*

1 – смесительные диоды;

2 – детекторные диоды;

3 – усилительные диоды;

4 – параметрические диоды;

5 – переключательные и ограничительные диоды;

6 – умножительные и надстроечные диоды;

7 – генераторные диоды;

8 – импульсные диоды.

*Стабилитроны (подкласс С):*

1 – стабилитроны мощностью не более 0,3 Вт с номинальным напряжением стабилизации менее 10 В;

2 – стабилитроны мощностью не более 0,3 Вт с номинальным напряжением стабилизации 10...100 В;

3 – стабилитроны мощностью не более 0,3 Вт с номинальным напряжением стабилизации более 100 В;

4 – стабилитроны мощностью не более 0,3...5 Вт с номинальным напряжением стабилизации менее 10 В;

5 – стабилитроны мощностью 0,3...5 Вт с номинальным напряжением стабилизации 10...100 В;

6 – стабилитроны мощностью 0,3...5 Вт с номинальным напряжением стабилизации более 100 В;

7 – стабилитроны мощностью 5...10 Вт с номинальным напряжением стабилизации менее 10 В;

8 – стабилитроны мощностью 5...10 Вт с номинальным напряжением стабилизации 10...100 В;

9 – стабилитроны мощностью 5...10 Вт с номинальным напряжением стабилизации более 100 В.

*Генераторы шума (подкласс Г):*

1 – низкочастотные генераторы шума;

2 – высокочастотные генераторы шума.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Система обозначений транзисторов

Система обозначений современных типов транзисторов установлена отраслевым стандартом ОСТ 11336.919-81. В основу системы обозначений положен буквенно-цифровой код.

Первый элемент (цифра или буква) обозначает исходный полупроводниковый материал, на основе которого изготовлен транзистор, второй элемент (буква) определяет подкласс (или группу) транзисторов, третий (цифра) — основные функциональные возможности транзистора, четвертый (число) — обозначает порядковый номер разработки технологического типа транзистора, пятый (буква) — условно определяет классификацию по параметрам транзисторов, изготовленных по единой технологии.

Для обозначения исходного материала используются следующие символы:

- Г или 1 — германий или его соединения;
- К или 2 — кремний или его соединения;
- А или 3 — соединения галлия (арсенид галлия);
- И или 4 — соединения индия.

Для обозначения подклассов используется одна из двух букв: Т — биполярные и П — полевые транзисторы.

Для обозначения наиболее характерных эксплуатационных признаков транзисторов применяются следующие цифры:

*для транзисторов малой мощности* (максимальная мощность, рассеиваемая транзистором, не более 0,3 Вт):

1 — с граничной частотой коэффициента передачи тока или максимальной рабочей частотой (далее граничной частотой) не более 3 МГц;

2 — с граничной частотой 3...30 МГц;

3 — с граничной частотой более 30 МГц;

*для транзисторов средней мощности* (0,3... 1,5 Вт):

6 — с граничной частотой не более 3 МГц;

7 — с граничной частотой 3...30 МГц;

8 — с граничной частотой более 30 МГц;

*для транзисторов большой мощности* (более 1,5 Вт):

9 — с граничной частотой не более 3 МГц;

10 — с граничной частотой 3...30 МГц;

11 — с граничной частотой более 30 МГц.

Для обозначения порядкового номера разработки используют двузначное число от 01 до 99. Если порядковый номер разработки превышает число 99, то применяется трехзначное число от 101 до 999.

В качестве классификационной литеры применяются буквы русского алфавита (за исключением З, О, Ч, Ы, Ш, Щ, Ю, Ъ, Ь, Э).

Стандарт предусматривает также введение в обозначение ряда дополнительных знаков. В качестве дополнительных элементов обозначения используют следующие символы:

цифры от 1 до 9 — для обозначения модернизаций транзистора, приводящих к изменению его конструкции или электрических параметров;

буква С — для обозначения наборов в общем корпусе (транзисторные сборки);

цифра, написанная через дефис, для бескорпусных транзисторов:

1 — с гибкими выводами без кристаллодержателя;

2 — с гибкими выводами на кристаллодержателе;

3 — с жесткими выводами без кристаллодержателя;

4 — с жесткими выводами на кристаллодержателе;

5 — с контактными площадками без кристаллодержателя и без выводов;

6 — с контактными площадками на кристаллодержателе, но без выводов.

Биполярные транзисторы, разработанные до 1964 г. и выпускаемые по настоящее время, имеют систему обозначений, включающую в себя два или три элемента.

Первый элемент обозначения — буква П, характеризующая класс биполярных транзисторов, или две буквы МП — для транзисторов в корпусе, герметизируемом способом холодной сварки.

Второй элемент — двух- или трехзначное число, которое определяет порядковый номер разработки и указывает на подкласс транзистора по роду исходного полупроводникового материала, значениям допустимой рассеиваемой мощности и граничной частоты:

от 1 до 99 — германиевые маломощные низкочастотные транзисторы;

от 101 до 199 — кремниевые маломощные низкочастотные транзисторы;

от 201 до 299 — германиевые мощные низкочастотные транзисторы;

от 301 до 399 — кремниевые мощные низкочастотные транзисторы;

от 401 до 499 — германиевые высокочастотные и СВЧ маломощные транзисторы;

от 501 до 599 — кремниевые высокочастотные и СВЧ маломощные транзисторы;

от 601 до 699 — германиевые высокочастотные и СВЧ мощные транзисторы;

от 701 до 799 — кремниевые высокочастотные и СВЧ мощные транзисторы.

Третий элемент обозначения (у некоторых типов он может отсутствовать) — буква, условно определяющая классификацию по параметрам транзисторов, изготовленных по единой технологии.

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### Система обозначений тиристоров

Выпускаемые с 1980 года тиристоры имеют классификацию и систему обозначений, установленные ГОСТ 20859.1-89. В основу обозначений тиристоров положен буквенно-цифровой код, состоящий из девяти элементов.

*Первый элемент* (буква или буквы) обозначает вид прибора: Т – тиристор; ТЛ – лавинный тиристор; ТС – симметричный тиристор (симистор); ТО – оптоотиристор; ТЗ – запираемый тиристор; ТБК – комбинированно выключаемый тиристор; ТД – тиристор-диод.

*Второй элемент* (буква) – подвид тиристора по коммутационным характеристикам: Ч – высокочастотный (быстро включающийся) тиристор; Б – быстродействующий; И – импульсный.

*Третий элемент* (цифра от 1 до 9) обозначает порядковый номер модификации (разработки).

*Четвертый элемент* (цифра от 1 до 9) – классификационный размер корпуса прибора.

*Пятый элемент* (цифра от 0 до 5) – конструктивное исполнение.

*Шестой элемент* – число, равное значению максимально допустимого среднего тока.

*Седьмой элемент* – буква Х для приборов с обратной полярностью (основание корпуса – катод).

*Восьмой элемент* – число, обозначающее класс по повторяющемуся импульсному напряжению в закрытом состоянии (сотни вольт).

*Девятый элемент* – группа цифр, обозначающая сочетание классификационных параметров:  $(du_{zc}/dt)$ . Аббревиатура «зс» означает запертое состояние.

Пример условных обозначений тиристоров по ГОСТ 20859.1–89:

ТЛ171-320-10-6 – тиристор лавинный первой модификации, размер шестигранника «под ключ» 41 мм, конструктивное исполнение – штыревое с гибким катодным выводом, максимально допустимый средний ток в открытом состоянии 320 А, повторяющееся импульсное напряжение в закрытом состоянии 1000 В (10-й класс), критическая скорость нарастания напряжения в закрытом состоянии 500 В/мкс.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

### Система обозначений интегральных микросхем

Условное обозначение интегральных микросхем включает в себя основные классификационные признаки. Оно состоит из четырех элементов.

Первый элемент — цифра, соответствующая конструктивно-технологической группе. Цифрами 1, 5, 6 и 7 в первом элементе обозначаются полупроводниковые интегральные микросхемы. Гибридным микросхемам присвоены цифры 2, 4 и 8. Пленочные, вакуумные и керамические интегральные микросхемы обозначаются цифрой 3.

Второй элемент, определяющий порядковый номер разработки серии, состоит из двух (от 00 до 99) или трех (от 000 до 999) цифр.

Третий элемент, обозначающий подгруппу и вид микросхемы, состоит из двух букв.

Четвертый элемент, обозначающий порядковый номер разработки микросхемы данной серии, состоит из одной или нескольких цифр.

Дополнительная буква в начале четырехэлементного обозначения указывает на особенность конструктивного исполнения:

Р — пластмассовый корпус типа ДИП;

А — пластмассовый планарный корпус;

Е — металлополимерный корпус типа ДИП;

С — стеклокерамический корпус типа ДИП;

И — стеклокерамический планарный корпус;

Н — керамический «безвыводной» корпус.

В начале обозначения для микросхем, используемых в условиях широкого применения, приводится буква К.

Серии бескорпусных полупроводниковых микросхем начинаются с цифры 7, а бескорпусные аналоги корпусных микросхем обозначаются буквой Б перед указанием серии.

Через дефис после обозначения указывается цифра, характеризующая модификацию конструктивного исполнения: 1 — с гибкими выводами; 2 — с ленточными (паучковыми) выводами, в том числе на полиамидном носителе; 3 — с жесткими выводами; 4 — на общей пластине (неразделенные); 5 — разделенные без потери ориентировки (наклеенные на пленку); 6 — с контактными площадками без выводов.

## РЕКОМЕНДОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Бородин И.Ф. Основы электроники [Текст]: учебн. пособие для вузов/И.Ф.Бородин, А.Х. Шогенов, Ю.А. Судник, В.М. Богоявленский. – М.: КолосС, 2009. – 207 с.
2. Гусев В. Г. Электроника и микропроцессорная техника [Текст]: учебник/В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев— 6-е изд., стер. — М. : КНОРУС, 2013. — 800 с.
3. Коваленко А.А. Основы микроэлектроники [Текст]: учебн. пособие для студ. высш. учеб. заведений/ А.А. Коваленко, М. Д. Петропавловский. – 3-е изд., стер. – М.: Издательский дом «Академия», 2010. – 240 с.
4. Лачин В.И. Электроника [Текст]: учеб. пособие/ В.И. Лачин, Н.С. Савелов. – Издание 8-е. – М.: Ростов н/Д, Феникс, 2010. – 703 с.
5. Миловзоров О. В. Электроника [Текст]: учебник для вузов/О.В. Миловзоров, И.Г. Панков. – 4-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2008. – 288 с.
6. Прянишников В.А. Электроника [Текст]: курс лекций/В.А. Прянишников.– СПб.: Корона-принт, 2004. – 416 с.