

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Владимирский государственный университет  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

Ю. Е. МИШУЛИН

# АНАЛОГОВАЯ СХЕМОТЕХНИКА

Учебное пособие



Владимир 2021

УДК 621.382  
ББК 32.844  
М71

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор  
зав. кафедрой информатики и защиты информации  
Владимирского государственного университета  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых  
*М. Ю. Монахов*

Кандидат технических наук, доцент  
доцент кафедры промышленной электроники  
и интеллектуальных цифровых систем  
Московского государственного технологического университета  
«СТАНКИН»  
*В. В. Филатов*

**Мишулин, Ю. Е.** Аналоговая схемотехника : учеб. пособие /  
М71 Ю. Е. Мишулин ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столето-  
вых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2021. – 212 с.  
ISBN 978-5-9984-1221-9

Содержит теоретические сведения о свойствах и характеристиках основных полупроводниковых элементов, принципах действия, способах создания и применения элементарных базовых функциональных узлов, составляющих основу современных электронных средств (устройств). Рассмотрены также принципы действия и устройство некоторых (наиболее распространенных) электронных средств.

Предназначено для студентов вузов направлений подготовки 15.03.06 «Мехатроника и робототехника», 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств» всех форм обучения, а также для студентов Центра реабилитации инвалидов.

Табл. 21. Ил. 154. Библиогр.: 12 назв.

УДК 621.382  
ББК 32.844

ISBN 978-5-9984-1221-9

© ВлГУ, 2021  
© Мишулин Ю. Е., 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
1. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ.....	7
1.1. Способы представления информации .....	7
1.2. Элементная база электронных устройств.....	14
1.3. Классификация электронных устройств.....	17
Контрольные вопросы.....	19
2. ДИСКРЕТНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ.....	20
2.1. Полупроводниковые диоды .....	20
2.1.1. Классификация диодов.....	23
2.1.2. Выпрямительные диоды.....	32
2.1.3. Импульсные диоды .....	46
2.1.4. Стабилитроны и стабисторы.....	47
2.1.5. Туннельные и обращенные диоды .....	51
2.1.6. Варикапы.....	53
2.1.7. Тиристоры.....	54
2.2. Полупроводниковые транзисторы .....	63
2.2.1. Биполярные транзисторы .....	63
2.2.2. Полевые транзисторы .....	73
2.2.3. Силовые транзисторы .....	86
2.3. Оптоэлектронные компоненты .....	99
2.3.1. Излучающие диоды.....	99
2.3.2. Фотодиоды .....	106
2.3.3. Фототранзисторы .....	108
2.3.4. Оптроны .....	109
Контрольные вопросы.....	111
3. УСИЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА НА ТРАНЗИСТОРАХ.....	114
3.1. Схемы питания усилительных каскадов.....	115
3.2. Основные характеристики усилительных устройств.....	116
3.3. Режимы работы усилителей .....	119
Контрольные вопросы.....	130
4. ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ .....	131
4.1. Структурная схема операционного усилителя.....	133
4.2. Основные параметры операционного усилителя.....	136
4.3. Частотные свойства операционного усилителя .....	138

4.4. Классификация операционных усилителей.....	139
Контрольные вопросы.....	143
<b>5. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ АНАЛОГОВЫХ СИГНАЛОВ НА ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЯХ.....</b>	<b>144</b>
5.1. Повторитель напряжения.....	144
5.2. Неинвертирующий усилитель.....	145
5.3. Инвертирующий усилитель.....	146
5.4. Дифференциальный усилитель.....	149
5.5. Инвертирующий сумматор.....	151
5.6. Схема сложения-вычитания.....	152
5.7. Неинвертирующий сумматор.....	154
5.8. Интегратор.....	154
5.9. Дифференциатор.....	158
5.10. Устройства сравнения аналоговых сигналов.....	161
5.10.1. Работа операционного усилителя при больших амплитудах входного сигнала.....	162
5.10.2. Однопороговое устройство сравнения.....	163
5.10.3. Регенеративная схема сравнения.....	165
5.10.4. Интегральные компараторы.....	169
Контрольные вопросы.....	170
<b>6. АНАЛОГО-ЦИФРОВЫЕ И ЦИФРОАНАЛОГОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ.....</b>	<b>172</b>
6.1. Цифроаналоговые преобразователи.....	172
6.1.1. Основные параметры ЦАП.....	174
6.1.2. ЦАП с суммированием токов.....	175
6.1.3. Применение цифроаналоговых преобразователей.....	181
6.2. Аналого-цифровые преобразователи.....	188
6.2.1. Основные параметры АЦП.....	191
6.2.2. АЦП мгновенных значений напряжения.....	192
6.2.3. АЦП средних значений напряжения.....	199
6.2.4. Интегральные микросхемы АЦП.....	203
6.2.5. Применение аналого-цифровых преобразователей.....	205
Контрольные вопросы.....	209
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>210</b>
<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....</b>	<b>211</b>

## ВВЕДЕНИЕ

В технике существуют такие области науки, как электротехника и электроника.

Электротехника выделилась из физики в самостоятельную область науки, в которой решаются такие вопросы, как получение, преобразование, передача и использование электрической энергии в практической деятельности человека, охватывающие сферу применения электромагнитных явлений в различных отраслях промышленности и в быту. Электротехника изучает проблемы, касающиеся силовых крупногабаритных электронных компонентов: линий электропередачи, электрических приводов, электростанций, трансформаторных подстанций и т. д.

Электроника – отрасль науки и техники, связанная с созданием и описанием физических принципов работы новых электронных приборов и устройств или электронных схем на их основе. В электронике основные компоненты – это радиоэлектронные компоненты, интегральные микросхемы, компьютеры и другие устройства на базе интегральных схем. Здесь значительное внимание уделяется вопросам получения, преобразования, передачи и использования информации и непосредственно алгоритмам взаимодействия тех или иных устройств, схем, потребителей.

В качестве носителя информации используются различные физические величины, такие как температура, скорость, перемещение, давление, звук.

Человек воспринимает информацию с помощью органов чувств. В электронных системах функции органов чувств выполняют датчики (сенсоры), которые преобразуют все физические величины в электрические сигналы: для света – фотоэлементы, для звука – микрофоны, для температуры – терморезистор или термопара.

Передача информации от одного устройства к другому осуществляется с помощью электрических сигналов, которые удобно передавать и обрабатывать. Любые другие физические величины могут быть преобразованы в электрические и наоборот.

После поступления информации человеческий мозг на основе обработки этой информации формирует управляющие воздействия для мышц и других механизмов. Аналогично в электронных системах

электрические сигналы управляют электрической, механической, тепловой и другими видами энергии посредством электродвигателей, электромагнитов, электрических источников света.

Учебное пособие соответствует программам ряда дисциплин: «Электроника», «Аналоговая и цифровая схемотехника», «Проектирование цифровых и аналоговых устройств» и др. Большинство выпущенных к настоящему времени учебников и учебных пособий по аналоговой и цифровой электронике либо посвящены отдельным разделам этих дисциплин, либо рассчитаны на большее количество аудиторных часов. Кроме того, в литературе недостаточно подробно рассмотрены вопросы проектирования таких устройств, или этот материал разбросан по многочисленным источникам.

Учебное пособие состоит из шести разделов. В первом разделе рассмотрены способы представления информации – аналоговой и цифровой, также приведена классификация электронных устройств. Второй раздел посвящен дискретным полупроводниковым приборам – диодам, тиристорам, биполярным и полевым транзисторам. Отдельно рассмотрены силовые полупроводниковые приборы и оптоэлектронные компоненты. В третьем разделе представлены усилительные устройства на транзисторах. Рассмотрены основные классы усилителей, построенных на транзисторах. Четвертый раздел посвящен операционным усилителям, их основным параметрам, классификации. Пятый раздел содержит информацию по преобразователям аналоговых сигналов, реализуемым на операционных усилителях. Рассмотрены принципы построения этих устройств, приведены их сравнительные характеристики. Отдельно выделены устройства сравнения аналоговых сигналов. Приведены примеры электронных схем на современной элементной базе. В шестом разделе рассмотрены основные типы и области применения цифроаналоговых и аналого-цифровых преобразователей.

# 1. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

## 1.1. Способы представления информации

Существует две формы электрических сигналов, с помощью которых передается информация и формируются управляющие воздействия.

1. Аналоговая форма сигнала. В этом случае электрический сигнал аналогичен исходному физическому в каждый момент времени, т.е. непрерывен во времени (рис. 1.1). Температура, давление, скорость изменяются по непрерывному закону – датчики преобразуют эти величины в электрический сигнал, который изменяется по такому же закону. Величины, представленные в такой форме, могут принимать бесконечно много значений в каком-то диапазоне.

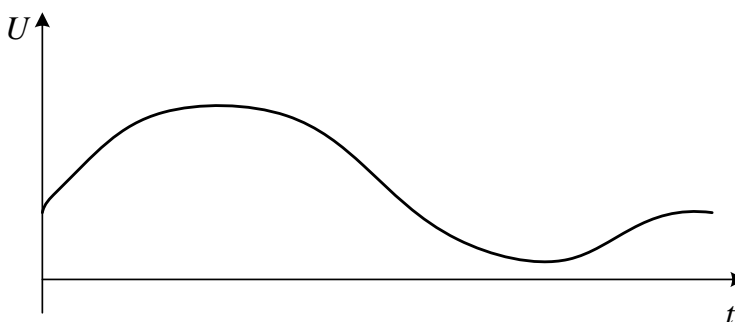


Рис. 1.1. Аналоговая форма сигнала

2. Дискретная форма сигнала. Сигнал представляет собой последовательность импульсов, в которых закодирована информация.

Под электрическим импульсом понимают кратковременное скачкообразное отклонение напряжения или тока от некоторого постоянного уровня (в основном нулевого), наблюдаемое в течение времени, меньшего или сравнимого с длительностью переходных процессов в схеме. Наиболее распространены импульсы прямоугольной формы. На рисунке 1.2, а приведена периодическая последовательность прямоугольных импульсов и их основные параметры. Импульсы характеризуются следующими параметрами:  $U_m$  – амплитуда (наибольшее значение) импульса. Амплитуда импульса выражается в вольтах или в амперах (для импульсов тока);  $\tau_{и}$  – длительность импульса;  $\tau_{п}$  – длительность паузы между импульсами;  $T = \tau_{и} + \tau_{п}$  – период повторения импульсов;  $f = \frac{1}{T}$  – частота повторения импульсов.

Важным параметром периодичности последовательности импульсов является скважность импульсов – это отношение периода повторения к длительности импульса, которая рассчитывается по формуле  $Q = \frac{T}{\tau_{и}}$ . Скважность – безразмерная величина, которая может изменяться в очень широких пределах, так как длительность импульсов может быть в сотни и даже тысячи раз меньше периода импульсов или, наоборот, занимать большую часть периода.

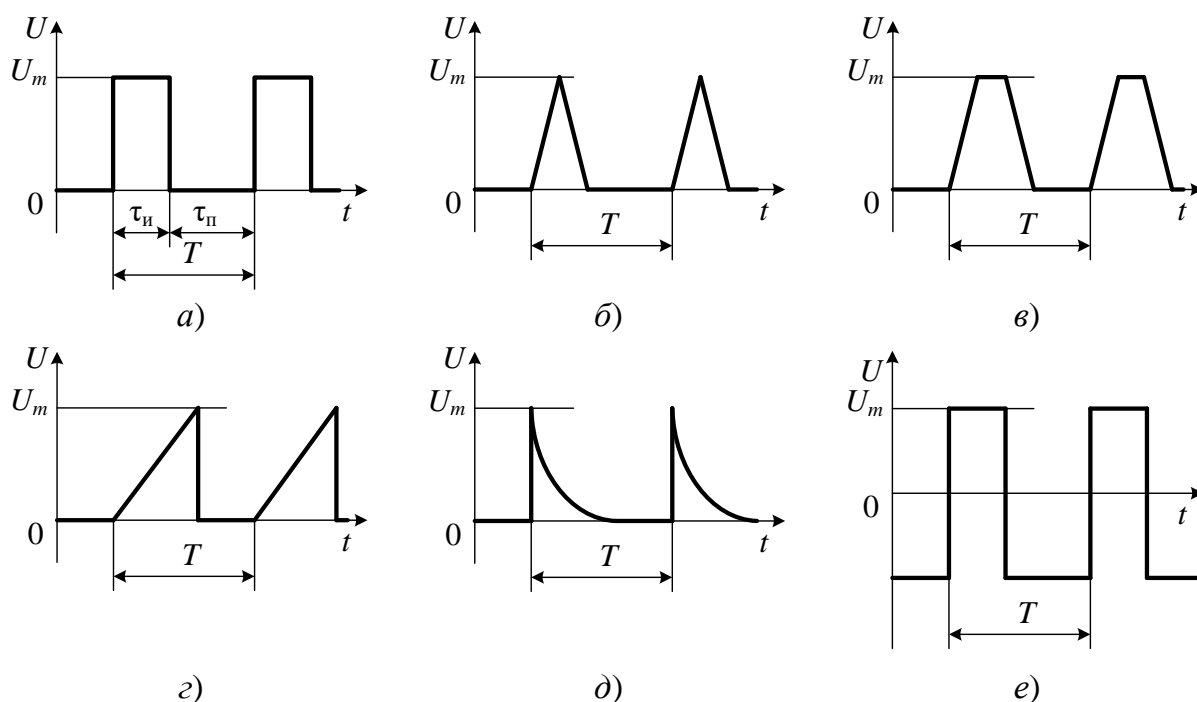


Рис. 1.2. Формы импульсов

Величина, обратная скважности, называется коэффициентом заполнения. Эта величина безразмерная, меньшая единицы. Она рассчитывают по формуле:  $D = \frac{1}{Q} = \frac{\tau_{и}}{T}$ .

Последовательность импульсов со скважностью  $Q=2$  называется «меандром». У такой последовательности  $T = 2\tau_{и}$

Наряду с прямоугольными импульсами в электронной технике широко применяются импульсы треугольной, трапецеидальной, пилообразной, остrokонечной формы, а также разнополярные (рис. 1.2, б-е) и другие виды импульсов.



На рисунке 1.2 показаны основные формы идеальных импульсов. На самом деле реальный электрический прямоугольный импульс имеет вид, показанный на рисунке 1.3.

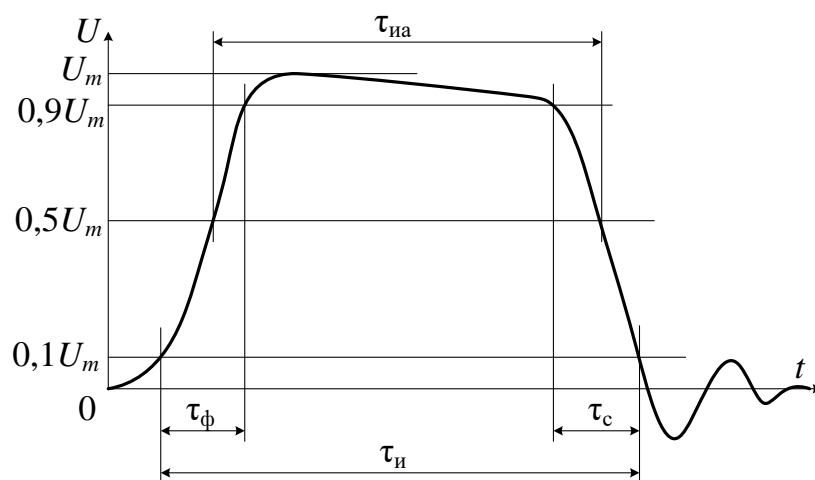


Рис. 1.3. Параметры импульса

Форму импульсов и свойства отдельных его участков с количественной стороны оценивают следующими параметрами:

$\tau_{и}$  — длительность импульса. Обычно измерения длительности импульсов или отдельных участков производят на определённом уровне от их основания. Если это не оговаривается, то длительность импульса определяется на нулевом уровне. Однако чаще всего длительность импульса определяется на уровне  $0,1U_m$  или  $0,5U_m$ , считая от основания. В последнем случае длительность импульса называется **активной** длительностью и обозначается  $\tau_{на}$ . При необходимости и в зависимости от формы импульсов принятые значения уровней для измерения специально оговариваются.

$\tau_{ф}$  — длительность фронта, определяемая временем нарастания импульса от уровня  $0,1U_m$  до уровня  $0,9U_m$ .

$\tau_{с}$  — длительность среза (заднего фронта), определяемая временем спада импульса от уровня  $0,9U_m$  до уровня  $0,1U_m$ . Обычно  $\tau_{ф}$  и  $\tau_{с}$  составляет единицы процентов от длительности импульса. Чем меньше  $\tau_{ф}$  и  $\tau_{с}$  по сравнению с  $\tau_{и}$ , тем больше форма импульса приближается к прямоугольной. Иногда вместо  $\tau_{ф}$  и  $\tau_{с}$  фронты импульса характеризуют скоростью нарастания (спада). Эту величину называют кру-

тизной ( $S$ ) фронта (среза) и выражают в вольтах в секунду (В/с) или киловольтах в секунду (кВ/с). Для прямоугольного импульса  $S = \frac{U_m}{\tau_{\phi}}$

Участок импульса между фронтами называют плоской вершиной.

В импульсных устройствах используются импульсы, имеющие длительности от долей секунды до наносекунд ( $10^{-9}$ с).

Различают импульсы положительной и отрицательной полярности, а также двусторонние (разнополярные) импульсы (рис. 1.2, е).

Таким образом, с помощью импульсов формируются дискретные сигналы.

В дискретной форме представления сигналов выделяют два режима работы – импульсный и цифровой.

**В импульсном режиме работы** кодируются не все значения амплитуды аналогового сигнала, а только в конкретные моменты времени. Это называется дискретизацией сигнала.

При дискретизации непрерывная функция  $U(t)$  преобразуется в последовательность ее отсчетов  $U(t_m)$  (рис. 1.4), и в заданные интервалы времени значение амплитуды кодируются прямоугольными импульсами. Кодирование непрерывного сигнала прямоугольными импульсами называется модуляцией сигнала.

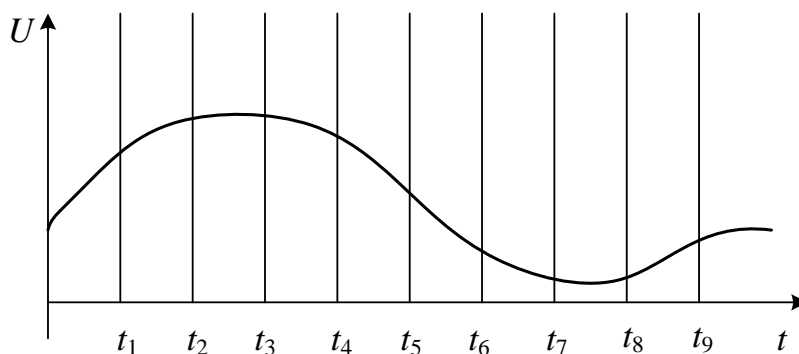


Рис. 1.4. Дискретизация сигнала

Существует несколько способов модуляции (рис. 1.5).

1. Амплитудно-импульсная модуляция (АИМ). При этом способе амплитуда импульсов в заданные интервалы времени пропорциональна амплитуде входного сигнала (рис. 1.5, а). При этом длительность  $\tau_{и}$  импульсов и период  $T$ , а, следовательно, и частота импульсов постоянны.

2. Широтно-импульсная модуляция (ШИМ) (рис. 1.5, б) – длительность (ширина) импульсов  $\tau_{и}$  пропорциональна амплитуде входного сигнала, амплитуда и частота импульсов постоянны.

3. Частотно-импульсная модуляция (ЧИМ) (рис. 1.5, в) – амплитуда входного сигнала определяет частоту следования импульсов, которые имеют постоянную длительность и амплитуду.

Существуют также другие виды модуляции.

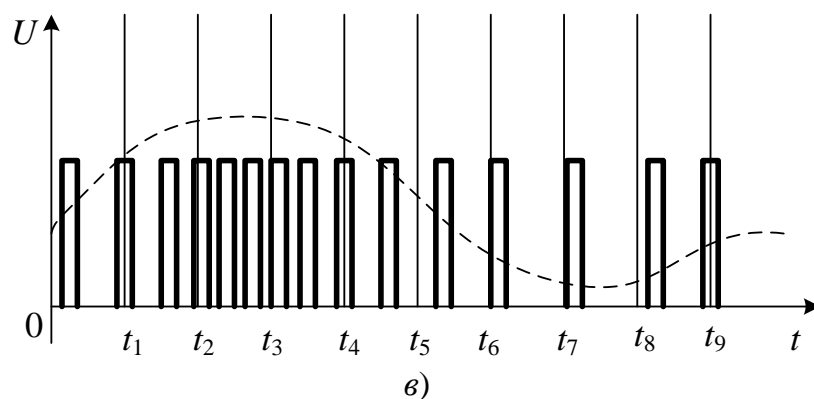
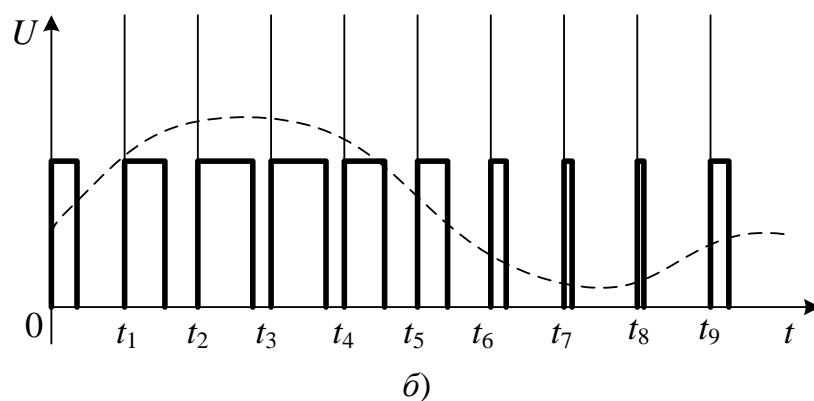
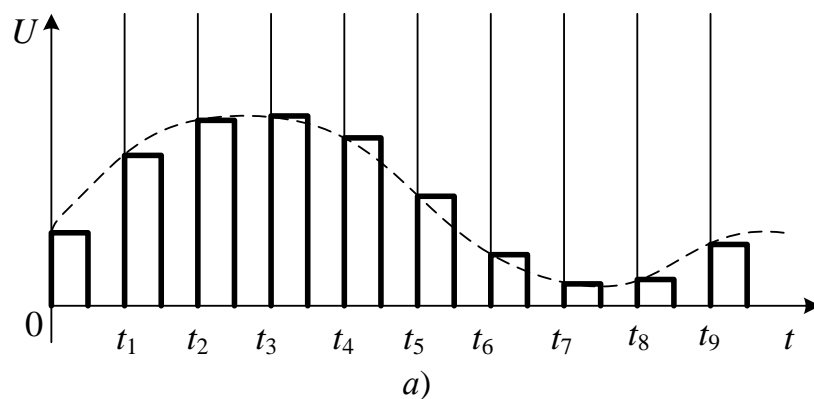


Рис. 1.5. Способы кодирования непрерывного сигнала прямоугольными импульсами  
 а) амплитудно-импульсная модуляция;  
 б) широтно-импульсная модуляция;  
 в) частотно-импульсная модуляция

При цифровом режиме работы также выполняется дискретизацией сигнала. На рис. 1.6 показан аналоговый (непрерывный) сигнал. Значения амплитуды аналогового сигнала в дискретные моменты времени представляются в виде двоичного кода.

В момент времени  $t_0$  амплитуда сигнала равна 18 В. В двоичном коде число 18 записывается в виде  $10010_2$ , который имеет 5 разрядов (бит). Дополнив его до 1 байта (8 бит) получим  $00010010$ . Аналогично кодируются значения амплитуды для остальных моментов времени  $t_i$  (см. таблицу).

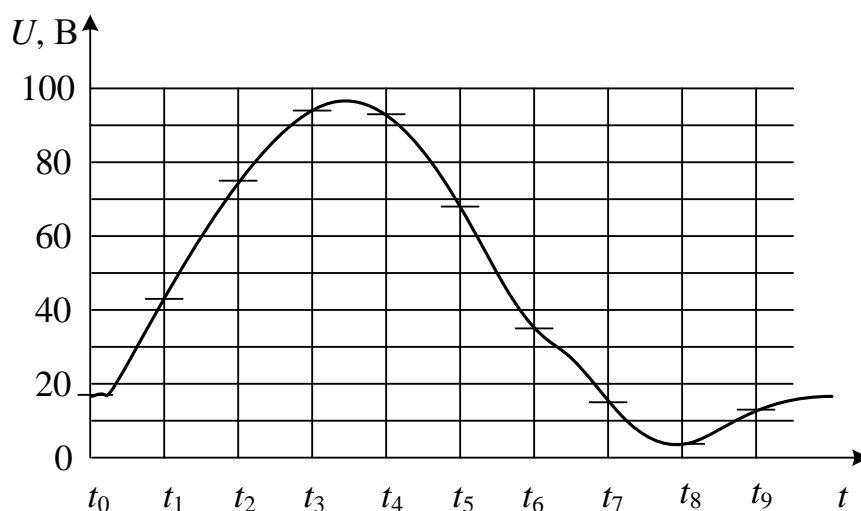


Рис. 1.6. Аналоговый (непрерывный) сигнал

Так как в цифровых устройствах передача информации осуществляется байтами, поэтому необходимо полученный двоичный код увеличить до 8 бит добавлением нулей в старшие разряды. Полученная информация передается в виде числа представленного цифровым кодом, которому соответствует определенный набор импульсов.

#### Кодирование аналогового сигнала

Время	Амплитуда, В	Двоичный код	Двоичный код – 1 байт
$t_0$	18	10010	00010010
$t_1$	43	101011	00101011
$t_2$	75	1001011	01001011
$t_3$	94	1011110	01011110
$t_4$	93	1011101	01011101
$t_5$	68	1000100	01000100
$t_6$	35	10011	00010011
$t_7$	15	1111	00001111
$t_8$	4	100	00000100
$t_9$	13	1101	00001101

Цифровые устройства чаще всего работают только с двумя значениями сигналов – нулём «0» (обычно низкий уровень напряжения  $U_0$  или отсутствие импульса) и «1» (обычно высокий уровень напряжения  $U_1$  или наличие прямоугольного импульса).

На рис. 1.7 показаны два способа представления информации:

а) потенциальный - значениям «0» и «1» соответствуют низкий и высокий уровни напряжения.

б) импульсный - двоичным переменным соответствует наличие или отсутствие электрических импульсов в определённые моменты времени.

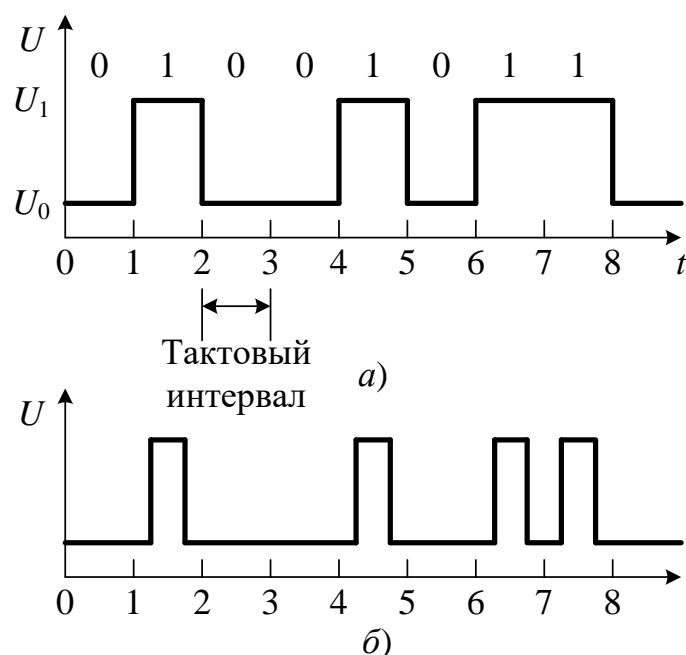


Рис. 1.7. Цифровой сигнал  
а) потенциальный; б) импульсный

Применение двоичной системы счисления обусловлено удобством создания, обработки, хранения и передачи сигналов. Двоичным цифрам 1 и 0 соответствуют состояния элементов: ключ замкнут – разомкнут, транзистор открыт – закрыт, конденсатор заряжен – разряжен, магнитный материал намагничен – размагничен и т.д. С помощью этих двух цифр можно отобразить любое число.

По сравнению с непрерывным (аналоговым), дискретный (импульсный и цифровой) режим работы имеет ряд преимуществ:

- уменьшение влияния температур и разброса параметров приборов, так как работа осуществляется в двух режимах: «включено» - «выключено»;

- повышение помехоустойчивости, точности и надежности электронных устройств;
- большие значения выходной мощности на такой же объем электронного устройства и более высокий коэффициент полезного действия;
- реализация дискретных устройств на однотипных элементах, легко выполняемых методом интегральной технологии (на микросхемах).

## **1.2. Элементная база электронных устройств**

Электроника прошла несколько этапов развития, за время которых сменилось несколько поколений элементной базы: электровакуумные приборы, полупроводниковые приборы, интегральные микросхемы (микроэлектроника), интегральная функциональных микроэлектронных устройства (функциональная микроэлектроника).

Элементная база электроники развивается непрерывно возрастающими темпами. Каждое из приведенных поколений, появившись в определенный момент времени, продолжает совершенствоваться в наиболее оправданных направлениях. Развитие изделий электроники от поколения к поколению идет в направлении их функционального усложнения, повышения надежности и срока службы, уменьшения габаритных размеров, массы, стоимости и потребляемой энергии, упрощения технологии и улучшения параметров электронной аппаратуры.

Весь арсенал средств, которым располагает современная электроника, был создан всего за несколько десятилетий. Фундамент электроники был заложен трудами физиков в XVIII– XIX в. Выделяют несколько этапов развития электроники.

*Первый этап. (до 1904 г.)*

К первому этапу относится изобретение в 1873 году русским инженером А.Н. Лодыгиным лампы накаливания с угольным стержнем. В 1883 г. Т. Эдисон открыл явление термоэлектронной эмиссии. В 1874 г. немецкий ученый Ф. Браун открыл выпрямительный эффект в контакте металла с полупроводником;

В 1895 г. А.С. Попов использовал этот эффект для детектирования радиосигналов, что позволило ему создать первый радиоприемник. Датой изобретения радио принято считать 7 мая 1895 г. Успехи электроники в этот период ее развития способствовали развитию радиотелеграфии.

В разных странах велись разработки и исследования различных типов простых и надежных обнаружителей высокочастотных колебаний – детекторов.

*Второй этап* – 1904 до 1948 г.

В это время основу элементной базы электронных устройств составляли электровакуумные и газоразрядные приборы. К ним относятся электронные лампы, электровакуумные трубки, газоразрядные индикаторы и др.

Второй этап развития электроники начался с 1904 г. когда английский ученый Д. Флеминг сконструировал электровакуумный диод. В 1906 г. Ли-де-Форест изобрел триод, а в 1919 году В. Шоттки разработал тетрод – электронную лампу с двумя сетками управляющей и экранирующей. В 1920 году М.А. Бонч-Бруевич разработал генераторные лампы с медным анодом и водяным охлаждением, мощностью до 1 кВт. В 1926 г. Бернард Теллеген изобрел лампу с тремя сетками (пентод). В 1929 г. В.К. Зворыкин изобрел кинескоп. С 30-х годов ведутся разработки приборов СВЧ–диапазона.

Полупроводниковые диоды впервые были созданы в 1906 г. для нужд детектирования радиосигналов. Оказалось, что контакты разнородных материалов обладают несимметричной проводимостью в зависимости от направления тока. Лучшими оказались контакты сульфида свинца (галенит) со сталью и оксида цинка (цинкит) с медным колчеданом (халькопирит). Кристаллические детекторы сразу получили широкое распространение, поскольку альтернативы были не слишком хорошие. Ламповый диод, созданный Флемингом, требует питания накала и по самому принципу действия раз в 10 менее чувствителен, чем полупроводниковый диод. На границе 30-х - 40-х годов появились первые германиевые и кремниевые диоды.

В настоящее время электровакуумные приборы занимают значительную нишу в ряду существующих классов приборов электроники и работают в области высоких уровней мощностей ( $10^6$ – $10^{11}$  Вт) и частот ( $10^8$ – $10^{12}$  Гц).

*Третий этап* – с 1948 г начало 60-х гг. – период создания и внедрения дискретных полупроводниковых приборов (диодов, транзисторов, тиристоров и т.д.).

В 1946 году при американской лаборатории «Bell Telephone Laboratories» была создана группа во главе с Уильямом Шокли, проводившая исследования свойств полупроводников на кремнии (Si) и

германии (Ge). 16 декабря 1947 года Уолтер Браттейн, и Джон Бардин, собрали первый работоспособный точечный транзистор, а 23 декабря продемонстрировали руководству Bell Labs транзисторный усилитель. В 1948—1950 годах Уильям Шокли создал теорию p-n-перехода. Точечный транзистор, выпускавшийся серийно около десяти лет, оказался тупиковой ветвью развития электроники – ему на смену пришли германиевые плоскостные транзисторы. Первый плоскостной транзистор был изготовлен 12 апреля 1950 года. В 1954 году Texas Instruments выпустила первый кремниевый транзистор, а в марте 1959 года Жан Эрни создал первый кремниевый планарный транзистор. Кремний вытеснил германий, а планарный процесс стал основной технологией производства транзисторов.

*Четвертый этап* – с 1960 г.

Этот период связан с бурным развитием микроэлектроники и с созданием интегральных схем различной степени интеграции, а также микросборок. На этом этапе электронные устройства характеризуются резким увеличением надежности, уменьшением габаритов, массы, энергопотребления.

В 1960 году Роберт Нойс из фирмы Fairchild предложил и запатентовал идею монолитной интегральной схемы, и, применив планарную технологию, изготовил первые кремниевые монолитные интегральные схемы. В монолитной интегральной схеме планарные диффузионные биполярные кремниевые транзисторы и резисторы соединены между собой тонкими и узкими полосками алюминия, лежащими на пассивирующем оксиде.

Алюминиевые соединительные дорожки изготавливаются методом фотолитографии, путем травления слоя алюминия, напыленного на всю поверхность оксида. Такая технология получила название – технология монолитных интегральных схем. Одновременно Джек Килби из фирмы Texas Instruments изготовил триггер на одном кристалле германия, выполнив соединения золотыми проволочками. Такая технология получила название – технология гибридных интегральных схем.

Развитие серийного производства интегральных микросхем шло степенями:

1) 1960 – 1969 гг. – интегральные схемы малой степени интеграции,  $10^2$  транзисторов на кристалле размером  $0,25 \times 0,5$  мм (МИС).



2) 1969 – 1975 гг. – интегральные схемы средней степени интеграции,  $10^3$  транзисторов на кристалле (СИС).

3) 1975 – 1980 гг. – интегральные схемы с большой степенью интеграции,  $10^4$  транзисторов на кристалле (БИС).

4) 1980 – 1985 гг. – интегральные микросхемы со сверхбольшой степенью интеграции,  $10^5$  транзисторов на кристалле (СБИС).

5) С 1985 г. – интегральные микросхемы с ультрабольшой степенью интеграции,  $10^7$  и более транзисторов на кристалле (УБИС).

*Пятый этап* – (с середины 1980-х годов)

Этап характеризуется дальнейшей микроминиатюризацией электронных устройств с использованием больших и сверхбольших интегральных схем. В это время развивается функциональная электроника, позволяющая реализовать определенную функцию аппаратуры без применения стандартных базовых элементов (диодов, резисторов, транзисторов и т.д.), базируясь непосредственно на физических явлениях в твердом теле.

*Шестой этап* – в последние годы развивается новое направление – наноэлектроника. Нанотехнологии позволяют манипулировать атомами (размещать в каком-либо порядке или в определенном месте), что дает возможность конструировать новые приборы с качественно новыми свойствами.

Охватывая широкий круг научно–технических и производственных проблем, электроника опирается на достижения в различных областях знаний. При этом, с одной стороны, электроника ставит задачи перед другими науками и производством, стимулируя их дальнейшее развитие, и с другой стороны, вооружает их качественно новыми техническими средствами и методами исследования.

### **1.3. Классификация электронных устройств**

Все электронные устройства (ЭУ) по способу формирования и передачи сигналов (*в соответствии с формой сигналов*) подразделяются на два класса: *аналоговые и дискретные*.

*Аналоговые* электронные устройства предназначены для приема, преобразования и передачи сигналов, которые изменяются по закону непрерывной (аналоговой) функции. Аналоговые ЭУ отличаются простотой, быстродействием, однако имеют низкую помехоустойчивость и нестабильность параметров при воздействии внешних деста-

билизирующих факторов, например температуры, влажности, времени и т.д.

*Дискретные* электронные устройства предназначены для приема, преобразования и передачи электрических сигналов, представленных в дискретной, чаще всего цифровой, форме. Такие устройства отличаются высокой помехоустойчивостью, небольшой потребляемой мощностью и стоимостью.

В свою очередь дискретные электронные устройства подразделяются на *импульсные и цифровые*.

*Импульсные* электронные устройства формируют импульсную последовательность сигналов. Процесс преобразования аналоговой информации в последовательность импульсов носит название импульсной модуляции. На практике широко используется амплитудная, широтно-импульсная и фазоимпульсная модуляция.

В *цифровых* электронных устройствах происходит кодирование сигнала, т.е. преобразование его в определенную последовательность однотипных импульсов.

Цифровые электронные устройства в настоящее время получили очень широкое распространение благодаря высокой надежности, высокой помехоустойчивости, возможности длительного хранения информации без ее потери; энергетической совместимости и интегральной технологичности элементной базы.

В ряде электронных устройств используются аналоговые и цифровые сигналы. Такие устройства относятся к *комбинированным* электронным устройствам.

К *аналоговым* электронным устройствам относятся: электронные усилители, операционные усилители, коммутаторы, компараторы, стабилизаторы напряжения и т.д.

К *импульсным* электронным устройствам относятся: мультивибраторы, одновибраторы, блокинг-генераторы, функциональные преобразователи, генераторы пилообразного напряжения, таймеры и т.д.

К *цифровым* электронным устройствам относятся: логические элементы, триггеры, регистры, счетчики, дешифраторы, шифраторы, мультиплексоры, демультиплексоры, сумматоры и т.д.

К *комбинированным* электронным устройствам относятся: аналого-цифровые преобразователи и цифро-аналоговые преобразовате-

ли. Все вышеперечисленные электронные устройства рассмотрены в последующих главах настоящего учебного пособия.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие существуют формы представления сигналов?
2. Какие основные параметры импульсов Вы знаете?
3. Что понимается под дискретизацией сигнала в импульсном режиме работы?
4. Что понимается под дискретизацией сигнала при цифровом режиме работы?
5. Какие существуют способы модуляции сигнала?
6. Какие параметры электрических сигналов могут использоваться в аналоговых, импульсных и цифровых устройствах для отображения реальной физической величины?
7. Какой диапазон изменения скважности импульса?
8. Сколько этапов развития элементной базы можно выделить к настоящему времени?
9. В чем принципиальное отличие элементной базы III-го и IV-го этапов?
10. Приведите примеры аналоговых устройств.
11. Приведите примеры импульсных устройств.
12. Приведите примеры цифровых устройств.

## 2. ДИСКРЕТНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

### 2.1. Полупроводниковые диоды

Полупроводниковый диод – это прибор с одним электрическим переходом и двумя выводами, в котором используются свойства  $p$ - $n$  перехода. Открытие  $p$ - $n$  перехода позволило совершить революцию в современной электронике [10].

Кроме проводников и диэлектриков существуют промежуточные материалы под названием полупроводники, которые по своим электрическим свойствам занимают промежуточное положение между металлами и диэлектриками. К полупроводникам относятся вещества с удельным сопротивлением от  $10^{-5}$  до  $10^2$  Ом·м.

Самым распространенным полупроводниковым элементом является кремний, которого огромное количество на нашей Земле (почти 30 % земной коры состоит из этого элемента). Далее идет уже довольно редкий металл – германий (его доля в земной коре порядка  $1,5 \cdot 10^{-4}$  %). Используются также арсенид галлия, фосфид индия и селен.

Учеными было совершено следующее открытие: если пролегировать кремний, то есть в состав добавить мышьяк, то кремний насыщается свободными электронами, а материал, в составе которого много свободных электронов является хорошим проводником. Так как электрон имеет отрицательный заряд, то таким образом пролегированный кремний можно считать  $n$  – проводником (*negative* – отрицательный).

Если тот же самый кремний пролегировать таким элементом как индий, то такой проводник обретает другие свойства. Если в первом случае у нас с вами появились свободные электроны, то во втором варианте получают положительные свободные заряды.

Но свободных электронов с положительным зарядом нет. Протоны (положительно заряженные частицы) связаны с нейтронами и являются составными частями ядра атома. То есть они не могут переносить положительный заряд. Получается, что сам заряд есть, а частиц его переносящих просто нет.

Такие частицы принято называть «дырками» с положительным зарядом. Дырка - это свободное место в атоме потерявшее электрон. И

тот полупроводниковый материал, в составе которого много таких «дырок», называется полупроводником  $p$  – типа (*positive* – положительный).

Для создания в исходном полупроводнике (германии или кремнии) проводимости  $n$ - или  $p$ -типа в качестве примесей могут использоваться фосфор, мышьяк, алюминий, индий и др.

Сам по себе кремний  $p$ -типа и  $n$ -типа не используется, а вот если пластины из данного элемента очень плотно соединить друг с другом, то в месте соединения возникает  $p$ - $n$  переход. Электрод, подключенный к области  $p$ -типа, называется анод, а электрод, подключенный к области  $n$ -типа, называется катод. Получившееся устройство называется полупроводниковым диодом (рис. 2.1). Такой диод, а, следовательно, и  $p$ - $n$  переход, обладает односторонней проводимостью, то есть проводит ток в направлении от анода к катоду, и не проводит обратно.

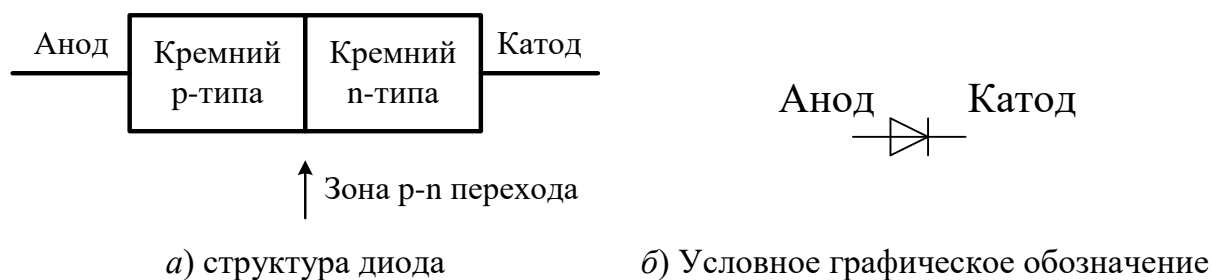


Рис. 2.1. Полупроводниковый диод

Когда к аноду и катоду не подключено напряжение, диод находится в состоянии покоя [12].

В части  $n$  имеются в наличии свободные электроны – отрицательно заряженные частицы. В части  $p$  находятся положительно заряженные ионы – дырки. В результате, в том месте, где есть близко расположенные частицы с зарядами разных знаков, возникает электрическое поле, притягивающее их друг к другу (рис. 2.2, а).

Под действием этого поля свободные электроны из части  $n$  дрейфуют через  $p$ - $n$  переход в часть  $p$  и заполняют некоторые дырки. В итоге получается очень слабый электрический ток, измеряемый в наноамперах. В результате, плотность вещества в  $p$  части повышается и возникает диффузия (стремление вещества к равномерной концентрации), толкающая частицы обратно на сторону  $n$ .

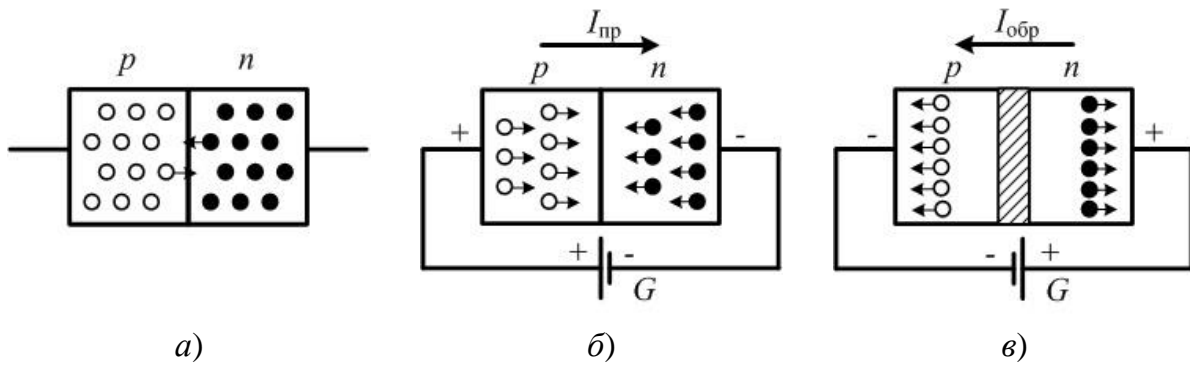


Рис. 2.2. Схематическое устройство и работа полупроводникового диода

Теперь рассмотрим, как у полупроводникового диода получается выполнять свою основную функцию – проводить ток только в одном направлении [2]. Если к его электродам подключить источник постоянного тока, так, чтобы его положительный полюс был соединен с анодом, а отрицательный – с катодом (рис. 2.2, б), то диод окажется в открытом состоянии. Такое подключение напряжения к  $p$ - $n$  переходу называется прямым смещением. В образовавшейся цепи пойдет ток, значение которого зависит от приложенного к нему напряжения и свойств диода. При такой полярности подключения батареи электроны в области типа  $n$  перемещаются от минуса к плюсу, т. е. в сторону области типа  $p$ , а дырки в области типа  $p$  движутся навстречу электронам – от плюса к минусу. Встречаясь на границе областей, называемой электронно-дырочным переходом или  $p$ - $n$  переходом, электроны как бы «впрыгивают» в дырки, в результате и те, и другие при встрече прекращают свое существование.

Контакт, соединенный с отрицательным полюсом элемента, может отдать области типа  $n$  практически неограниченное количество электронов, пополняя убыль электронов в этой области, а контакт, соединенный с положительным полюсом элемента, может принять из области типа  $p$  такое же количество электронов, что равнозначно введению в него соответствующего количества дырок. В этом случае сопротивление  $p$ - $n$  перехода мало, вследствие чего через диод идет ток, называемый *прямым током*. Чем больше площадь  $p$ - $n$  перехода и напряжение источника питания, тем больше этот прямой ток.

Если полюсы источника поменять местами, как это показано на рис. 2.2, в, диод окажется в закрытом состоянии. Такое подключение напряжения к  $p$ - $n$  переходу называется обратным смещением. В этом случае электрические заряды в диоде поведут себя иначе. Теперь,

удаляясь от  $p$ - $n$  перехода, электроны в области типа  $n$  будут перемещаться к положительному, а дырки в области типа  $p$  к отрицательному контакту диода. В результате граница областей с различными типами электропроводности как бы расширится, образуя зону, обедненную электронами и дырками (на рисунке она заштрихована) и, следовательно, оказывающую току очень большое сопротивление. Однако в этой зоне небольшой обмен носителями тока между областями диода все же будет происходить. Поэтому через диод пойдет ток, но во много раз меньший, чем прямой. Этот ток называют *обратным током* диода. На графиках, характеризующих работу диода, прямой ток обозначают  $I_{пр}$ , а обратный  $I_{обр}$ .

### ***2.1.1. Классификация диодов***

*По исходному полупроводниковому материалу* диоды делят на кремниевые ( $Si$  -99% всего парка диодов), германиевые ( $Ge$ ), арсенид галлиевые ( $GaAs$ ), из фосфида индия ( $InP$ ) и др.

Наиболее распространенными являются первые три материала. Кремний – относительно недорогой и простой в обработке материал, имеющий наиболее широкое распространение.

Германий – более редкий и дорогой материал. Вследствие низкого падения напряжения германиевые приборы используются в малоомощных и прецизионных устройствах.

На основе арсенид галлия изготавливают СВЧ диоды, светодиоды.

*По конструктивно-технологическому признаку* диоды бывают плоскостные, точечные и сплавные, микросплавные, диффузионные и др.

Плоскостные диоды представляют одну полупроводниковую пластину, в которой имеются две области с различной примесной проводимостью. Наиболее популярны изделия из германия и кремния. Преимущества таких моделей – возможность эксплуатации при значительных прямых токах, в условиях высокой влажности. Из-за высокой барьерной емкости они могут работать только с низкими частотами. Их главные области применения – выпрямители переменного тока, устанавливаемые в блоках питания.

Точечные диоды имеют крайне малую площадь  $p$ - $n$  перехода и приспособлены для работы с малыми токами. Называются высокочастотными, поскольку используются в основном для преобразования модулированных колебаний значительной частоты.

Микросплавные модели получают путем сплавления монокристаллов полупроводников  $p$ -типа и  $n$ -типа. По принципу действия такие приборы – плоскостные, но по характеристикам они аналогичны точечным.

Диффузионный метод изготовления  $p$ - $n$  перехода основан на том, что атомы примеси диффундируют в основной полупроводник. Для создания  $p$  слоя используют диффузию акцепторного элемента (бора или алюминия для кремния, индия для германия) через поверхность исходного материала.

*По рабочей частоте* диоды делятся на низкочастотные, высокочастотные, СВЧ.

*По назначению* полупроводниковые диоды делят на следующие основные группы: выпрямительные, импульсные, стабилитроны (опорные диоды), стабисторы, варикапы, туннельные диоды, обращенные диоды, тиристоры, фотодиоды, светодиоды и другие.

### ***Система обозначений полупроводниковых приборов.***

На данный момент ***в нашей стране*** используется система обозначения полупроводниковых приборов, установленная отраслевым стандартом ОСТ 11.336.919-81. Согласно данной системе устанавливается система классификации и обозначений состоящая из пяти элементов.

*Первый элемент* (буква или цифра) - обозначает исходный полупроводниковый материал, на базе которого создан полупроводниковый прибор. Для приборов общегражданского применения используются буквы Г, К, А и И, являющиеся начальными буквами в названии полупроводникового материала. Для приборов специального применения (более высокие требования при испытаниях, например выше температура,) вместо этих букв используются цифры от 1 до 4:

Г или 1 – германий.

К или 2 – кремний,

А или 3 – соединения галлия (например, арсенид галлия),



И или 4 – соединения индия (например, фосфид индия).

*Второй элемент* – буква, обозначает подкласс полупроводниковых приборов. Обычно буква выбирается из названия прибора, как первая буква названия.

*Третий элемент* – цифра, в обозначении полупроводниковых приборов, определяет основные функциональные возможности прибора. У различных подклассов приборов наиболее характерные эксплуатационные параметры (функциональные возможности) различные. В таблице 2.1 приведены значения цифр в третьем элементе условных обозначений для различного класса полупроводниковых приборов.

Таблица 2.1. Система обозначения полупроводниковых приборов

Подкласс приборов		Основные функциональные возможности прибора	
Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
1	2	3	
СВЧ диоды	А	смесительные	1
		детекторные	2
		модуляторные	3
		параметрические	4
		переключательные и ограничительные	5
		умножительные и настроечные	6
		генераторные	7
Варикапы	В	Подстроечные	1
		Умножительные (варакторы)	2
Генераторы шума	Г	Низкочастотные	1
		Высокочастотные	2

Продолжение таблицы 2.1

1	2	3	4
Диоды выпрямительные, универсальные, импульсные	Д	Диоды выпрямительные с прямым током менее 0,3 А	1
		Диоды выпрямительные с прямым током 0,3...10 А	2
		Диоды прочие (магнитодиоды, термодиоды, и др.)	3
		Диоды импульсные, с временем восстановления более 500 нс	4
		Диоды импульсные, с временем восстановления 150...500 нс	5
		Диоды импульсные, с временем восстановления 30...150 нс	6
		Диоды импульсные, с временем восстановления 5...30 нс	7
		Диоды импульсные, с временем восстановления 1...5 нс	8
		Диоды импульсные, с эффективным временем жизни неосновных носителей заряда менее 1 нс	9
Туннельные и обращённые диоды	И	Усилительные	1
		Генераторные	2
		Переключательные	3
		Обращённые	4
Излучающие оптоэлектронные приборы	Л	Инфракрасные излучающие диоды	1
		Инфракрасные излучающие модули	2
		Светоизлучающие диоды	3
		Знаковые индикаторы	4
		Знаковые табло	5
		Шкалы	6
		Экраны	7

Продолжение таблицы 2.1

1	2	3	4
Тиристоры диодные	Н		1
Оптопары	О	Резисторные Диодные Тиристорные Транзисторные	Р Д У Т
Транзисторы полевые	П	Низкой частоты ( $F_{гр} < 3$ МГц), мощностью не более 0,3 Вт	1
		Средней частоты ( $F_{гр} = 3 \dots 30$ МГц), мощностью не более 0,3 Вт	2
		ВЧ и СВЧ ( $F_{гр} > 30$ МГц), мощностью не более 0,3 Вт	3
		Низкой частоты ( $F_{гр} < 3$ МГц), мощность 0,3...1,5 Вт	4
		Средней частоты ( $F_{гр} = 3 \dots 30$ МГц), мощность 0.3-1.5 Вт	5
		ВЧ и СВЧ ( $F_{гр} > 30$ МГц), мощность 0.3...1,5 Вт	6
		Низкой частоты ( $F_{гр} < 3$ МГц), мощность $> 1,5$ Вт	7
		Средней частоты ( $F_{гр} = 3 \dots 30$ МГц), мощность $> 1,5$ Вт	8
		ВЧ и СВЧ ( $F_{гр} > 30$ МГц), мощность $> 1,5$ Вт	9
Стабилитроны	С	Мощностью менее 0,3 Вт, с напряжением стабилизации менее 10 В	1
		Мощностью менее 0,3 Вт, с напряжением стабилизации 10...100 В	2
		Мощностью менее 0,3 Вт, с напряжением стабилизации более 100 В	3

Продолжение таблицы 2.1

1	2	3	4
Стабилитроны	С	Мощностью 3...5 Вт, с напряжением стабилизации менее 10 В	4
		Мощностью 3...5 Вт, с напряжением стабилизации 10...100 В	5
		Мощностью 3...5 Вт, с напряжением стабилизации более 100 В	6
		Мощностью 5...10 Вт, с напряжением стабилизации менее 10 В	7
		Мощностью 5...10 Вт, с напряжением стабилизации 10...100 В	8
		Мощностью 5...10 Вт, с напряжением стабилизации более 100 В	9
Транзисторы биполярные	Т	Низкой частоты ( $F_{гр} < 3$ МГц), мощностью не более 0,3 Вт	1
		Средней частоты ( $F_{гр} = 3...30$ МГц), мощностью не более 0,3 Вт	2
		ВЧ и СВЧ ( $F_{гр} > 30$ МГц), мощностью не более 0,3 Вт	3
		Низкой частоты ( $F_{гр} < 3$ МГц), мощность 0,3...1,5 Вт	4
		Средней частоты ( $F_{гр} = 3...30$ МГц), мощность 0,3...1,5 Вт	5
		ВЧ и СВЧ ( $F_{гр} > 30$ МГц), мощность 0,3...1,5 Вт	6
		Низкой частоты ( $F_{гр} < 3$ МГц), мощность $> 1,5$ Вт	7
		Средней частоты ( $F_{гр} = 3...30$ МГц), мощность $> 1,5$ Вт	8
ВЧ и СВЧ ( $F_{гр} > 30$ МГц), мощн. $> 1,5$ Вт	9		

Продолжение таблицы 2.1

1	2	3	4
Тиристоры триодные	у	Незапираемые, с максимальным допустимым средним током в открытом состоянии менее 0,3 А (с максимальным импульсным током менее 15 А)	1
		Незапираемые, с максимальным допустимым средним током в открытом состоянии 0,3...10 А (с максимальным импульсным током 15...100 А)	2
		Незапираемые, с максимальным допустимым средним током в открытом состоянии более 10 А (с максимальным импульсным током более 100 А)	7
		Запираемые, с максимальным допустимым средним током в открытом состоянии менее 0,3 А (с максимальным импульсным током менее 15 А)	3
		Запираемые, с максимальным допустимым средним током в открытом состоянии 0,3...10 А (с максимальным импульсным током 15...100 А)	4
		Запираемые, с максимальным допустимым средним током в открытом состоянии более 10 А (с максимальным импульсным током более 100 А)	8
		Симметричные, с максимальным допустимым средним током в открытом состоянии менее 0,3 А (с максимальным импульсным током менее 15 А)	5
		Симметричные, с максимальным допустимым средним током в открытом состоянии 0,3...10 А (с максимальным импульсным током 15...100 А)	6
		Запираемые, с максимальным допустимым средним током в открытом состоянии более 10 А (с максимальным импульсным током более 100 А)	9

Окончание таблицы 2.1

1	2	3	4
Выпрямительные столбы и блоки	Ц	Выпрямительные столбы со средним значением прямого тока не более 0,3 А	1
		Выпрямительные столбы со средним значением прямого тока от 0,3 до 10 А	2
		Выпрямительные блоки со средним значением прямого тока не более 0,3 А	3
		Выпрямительные блоки со средним значением прямого тока более 0,3 А	4

*Четвертый элемент* – две либо три цифры, означает порядковый номер технологической разработки, и изменяется от 01 до 999.

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

***Примеры обозначений:***

КД202А – кремниевый выпрямительный диод, с прямым током 0,3...10 А, 02 порядковый номер, разновидность типа А;

2С920 — кремниевый стабилитрон мощностью 5...10 Вт с напряжением стабилизации более 100 В, разновидности типа А;

АИ301Б — арсенид галлиевый туннельный диод переключающей разновидности типа Б.

Иногда встречаются диоды, обозначенные по устаревшим системам: Д7А, Д226Б, Д18.

В условное обозначение диода не всегда входят некоторые технические данные, поэтому их необходимо искать в справочниках по полупроводниковым приборам.

***Цифробуквенная маркировка полупроводниковых приборов по американской системе JEDEC***

1-я цифра (число *p-n* переходов):

1 – диод;

2 – транзистор;

3 – тиристор;

За цифрой следует буква N и серийный номер. Пример: 1N4148, 2N5551.

### ***Цифробуквенная маркировка полупроводниковых приборов по европейской системе PRO ELECTRON***

1 буква – код материала:

A – германий; B – кремний; C – арсенид галлия; R – сульфид кадмия; D – антимонид индия.

2 буква - назначение:

A – маломощный диод; B – варикап; C – маломощный, низкочастотный транзистор; D – мощный, низкочастотный транзистор; E – туннельный диод; F – маломощный высокочастотный транзистор; G – несколько приборов в одном корпусе; H – магнитодиод; L – мощный высокочастотный транзистор; M – датчик Холла; P – фотодиод, фототранзистор; Q – светодиод; R – маломощный регулирующий или переключающий прибор; S – маломощный переключающий транзистор; T – мощный регулирующий или переключающий прибор; U – мощный переключающий транзистор; X – умножительный диод; Y – мощный выпрямительный диод; Z – стабилитрон.

3 элемент – цифры 100...999 – приборы широкого применения, Z10...A99 – приборы для промышленной и специальной аппаратуры.

4 и 5 элементы – буквы и цифры: для *стабилитронов* – допустимое изменение номинального напряжения стабилизации (буква A – 1%, B – 2%, C – 5%, D – 10%, E – 15%) и напряжение стабилизации, B (цифра); для *выпрямительных диодов* – максимальная амплитуда обратного напряжения, B (цифра); для *тиристоров* – меньшее из значений максимального напряжения включения или максимальная амплитуда обратного напряжения, B (цифра).

Пример: BC547C, BUZ11, BU508

### ***Цифробуквенная маркировка полупроводниковых приборов по японской системе JIS***

Первый элемент - цифра:

0 – фотодиод, фототранзистор; 1 – диод; 2 – транзистор; 3 – тиристор.

Второй элемент - буква S (Semiconductor)

Третий элемент - тип прибора:

А – высокочастотный *p-n-p* транзистор; В – низкочастотный *p-n-p* транзистор; С – высокочастотный *n-p-n* транзистор; D – низкочастотный *n-p-n* транзистор; Е – диод Есаки; F – тиристор; G – диод Ганна; H – однопереходной транзистор; I – полевой транзистор с *p*-каналом; K – полевой транзистор с *n*-каналом; M – симметричный тиристор (семистор); Q – светодиод; R – выпрямительный диод; S – слаботочный диод; T – лавинный диод; V – варикап; Z – стабилитрон.

Четвертый элемент обозначает регистрационный номер, начиная с числа 11.

Пятый элемент – одна или две буквы – обозначает разные параметры для одного типа прибора.

Пример: 2SA273 (A373), 2SD1555H (D1555).

### ***Цифробуквенная маркировка полупроводниковых приборов компании NEC***

Первый элемент - буква, обозначающая тип прибора:

AD – лавинно-пролетные диоды; GD – диоды Ганна; GH – смесительные германиевые диоды; H – фототранзисторы; PS – оптопары; RD – стабилитроны; SD – малосигнальные диоды; SE – инфракрасные диоды; SG – светодиоды зеленого цвета свечения; SH – точечно-контактные кремниевые диоды; SM – арсенид-галиевые диоды с барьером Шоттки; SR – светодиоды красного цвета свечения; SV – варакторы; SY – светодиоды желтого цвета свечения; V – новые ППП; VD – варисторы.

Второй элемент – регистрационный номер

#### ***2.1.2. Выпрямительные диоды***

Выпрямительный полупроводниковый диод (рис. 2.3) – это полупроводниковый диод, предназначенный для преобразования переменного тока в постоянный. В результате работы диодного прибора происходит срезание отрицательных полувольт переменного тока.





Рис. 2.3. Выпрямительные диоды

В основе работы выпрямительных диодов лежит свойство односторонней проводимости  $p-n$  перехода, которое заключается в том, что последний хорошо проводит ток (имеет малое сопротивление) при прямом включении и практически не проводит ток (имеет очень высокое сопротивление) при обратном включении.

Как известно, прямой ток диода создается основными, а обратный – не основными носителями заряда. Концентрация основных носителей заряда на несколько порядков превышает концентрацию не основных носителей, чем и обуславливаются вентильные свойства диода.

Основными параметрами выпрямительных полупроводниковых диодов являются:

- $I_{пр}$  – постоянный прямой ток, протекающий через диод в прямом направлении;
- $I_{пр\ max}$  – максимально допустимый выпрямленный прямой ток диода;
- $U_{обр\ max}$  – максимально допустимое обратное постоянное напряжение, при котором диод еще может нормально работать длительное время;
- $I_{обр}$  – постоянный обратный ток, протекающий через диод при обратном напряжении, равном  $U_{обр\ max}$  ;
- $I_{выпр}$  – максимально допустимый средний выпрямленный ток, который может длительно проходить через диод при допустимой температуре его нагрева;

–  $P_{\max}$  – максимально допустимая рассеиваемая мощность при прямом включении диода, при которой обеспечивается заданная надежность диода;

–  $U_{\text{пр}}$  – постоянное прямое напряжение;

–  $C_{\text{д}}$  – общая емкость диода;

–  $R_{\text{пр}}$  – статическое сопротивление открытого диода в заданной точке ВАХ с координатами  $I_{\text{пр А}}$  и  $U_{\text{пр А}}$ ;

–  $R_{\text{обр}}$  – статическое сопротивление закрытого диода в заданной точке ВАХ с координатами  $I_{\text{обр В}}$  и  $U_{\text{обр В}}$ ;

*По мощности рассеивания*, которая зависит от наибольшего разрешенного прямого тока  $I_{\text{пр max}}$ , выпрямительные диоды делят на три типа – маломощные, средней мощности, мощные.

– Маломощные диоды могут использоваться в цепях, в которых величина тока не превышает 0,3 А. Такие диоды отличаются малой массой и компактными габаритами, поскольку их корпус изготавливается из полимерных материалов.

– Диоды средней мощности могут работать в диапазоне токов от 0,3А до 10,0 А. В большинстве случаев они имеют металлический корпус и жесткие выводы. Производят их в основном из очищенного кремния. Со стороны катода изготавливается резьба для фиксации на теплоотводящем радиаторе.

– Мощные (силовые) диоды работают в цепях с током более 10 А. Их корпуса изготавливают из металлокерамики и металлокерамики. Конструктивное исполнение – штыревое или таблеточное. Производители предлагают модели, рассчитанные на токи до 100 000 А и напряжение до 6 кВ. Изготавливаются в основном из кремния.

Основной характеристикой диода является его ВАХ – вольтамперная характеристика – зависимость тока, проходящего через *p-n* переход, от величины и полярности приложенного к нему напряжения (рис. 2.4). Она нелинейная и имеет фактически экспоненциальный характер.

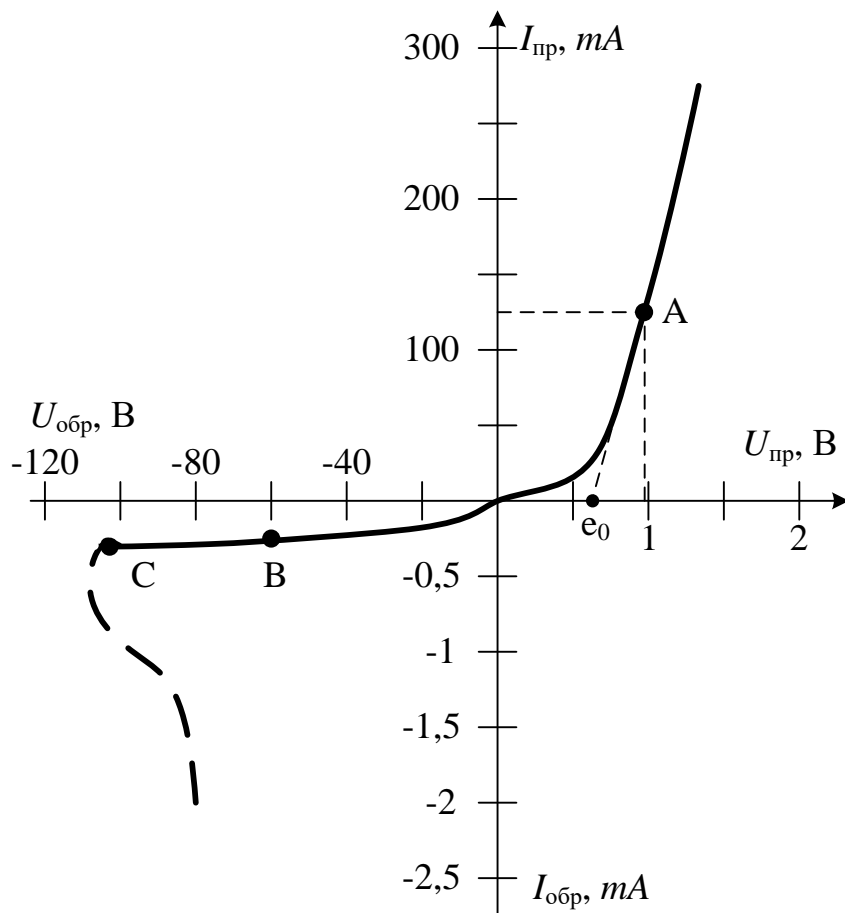


Рис. 2.4. Вольтамперная характеристика полупроводникового диода

Вольтамперная характеристика состоит как бы из двух ветвей: прямая ветвь, в правой верхней части, соответствует прямому (пропускному) току через диод, и обратная ветвь, в левой нижней части, соответствующая обратному (закрытому) току через диод. Обратную ветвь ВАХ показывают в другом масштабе, поэтому наблюдается излом характеристики в начале координат.

При увеличении прямого напряжения через  $p-n$  переход ток вначале возрастает медленно, а затем с величины  $e_0$  начинается участок быстрого нарастания прямого тока через диод с увеличением прямого напряжения. Характеристика становится почти линейной, и прямое статическое сопротивление открытого диода имеет почти постоянное значение, т.к. запирающий слой исчезает.

Величина  $e_0$  называется напряжением отсечки («пятка ВАХ»).

Обратная ветвь идет почти параллельно горизонтальной оси и характеризует медленный рост обратного тока. Чем круче к верти-

кальной оси прямая ветвь и чем ближе к горизонтальной обратная ветвь, тем лучше выпрямительные свойства диода. Наличие небольшого обратного тока является недостатком диодов. Из кривой вольт-амперной характеристики видно, что прямой ток диода ( $I_{пр}$ ) в сотни раз больше обратного тока ( $I_{обр}$ ).

При включении диода в обратном, т.е. в непроводящем, направлении через него протекает малый обратный ток (единицы или десятки микроампер). Этот ток мало изменяется при возрастании обратного напряжения. Однако при достижении обратным напряжением точки  $C$  наступает пробой  $p-n$  перехода, сопротивление запирающего слоя уменьшается и обратный ток резко возрастает. Это напряжение называется напряжением пробоя  $U_{проб}$ .

Различают два вида пробоя  $p-n$  перехода – электрический (обратимый) и тепловой (необратимый).

*Электрический пробой* возникает в результате воздействия сильного электрического поля в  $p-n$  переходе. Такой пробой является обратимым, то есть он не приводит к повреждению перехода, и при снижении обратного напряжения свойства диода сохраняются.

Электрический пробой разделяется на туннельный и лавинный пробой.

*Туннельный пробой* объясняется явлением туннельного эффекта, который заключается в переходе электронов из области  $p$ -типа в область  $n$ -типа без изменения своей энергии. Для туннельного пробоя характерен резкий рост обратного тока при незначительном обратном напряжении – обычно несколько вольт. На основе этого эффекта работают туннельные диоды.

*Лавинный пробой* обусловлен лавинным размножением носителей заряда. Это приводит к резкому увеличению обратного тока при практически неизменном напряжении. Напряжение лавинного пробоя составляет десятки – сотни вольт.

В таком режиме работают стабилитроны – это лавинные диоды, предназначенные работать при обратном включении для стабилизации напряжения.

*Тепловой пробой* возникает в результате перегрева  $p-n$  перехода в момент протекания через него тока большого значения и при недо-

статочном теплоотводе, не обеспечивающем устойчивость теплового режима перехода.

При увеличении приложенного к  $p-n$  переходу обратного напряжения рассеиваемая мощность на переходе растет. Это приводит к увеличению температуры перехода и соседних с ним областей полупроводника. При плохих условиях теплоотдачи от  $p-n$  перехода происходит лавинообразное нарастание температуры, что приводит к разрушению перехода.

С увеличением температуры число не основных носителей заряда увеличивается за счет перехода части электронов из валентной зоны в зону проводимости и образования пар носителей заряда электрон-дырка. Поэтому обратный ток диода возрастает.

Прямое падение напряжения с увеличением температуры уменьшается, что связано с уменьшением высоты потенциального барьера. Изменение вольтамперной характеристики полупроводникового диода от температуры показано на рис. 2.5. Типовые значения параметров диода приведены в таблице 2.2.

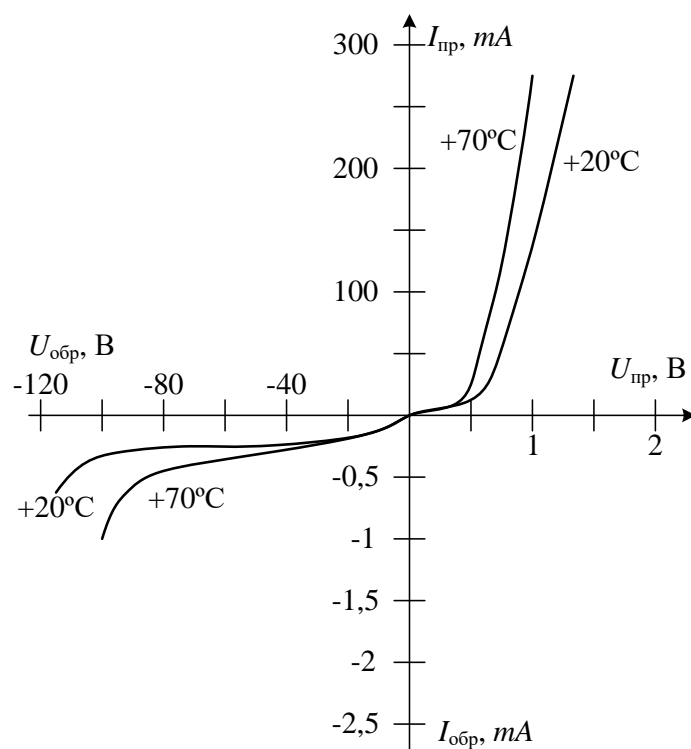


Рис. 2.5. Изменение вольтамперной характеристики полупроводникового диода от температуры

Таблица 2.2. Типовые значения параметров диода

Параметр	Кремниевые диоды	Германиевые диоды
Статическое сопротивление открытого диода $R_{пр}$	десятки ÷ сотни Ом	10...50 Ом
Статическое сопротивление закрытого диода $R_{обр}$	сотни МОм	единицы МОм
Напряжение отсечки $e_0$	0,4...0,6В	0,2...0,3В
Постоянное прямое падение напряжения $U_{пр}$	0,7...1,4 В	0,3...0,6 В
Допустимая рабочая температура $p-n$ перехода	+150°C	+85°C

Отдельно следует выделить диоды Шоттки, которые используются и как функциональные (сигнальные) диоды и как силовые.

Диод Шоттки – это полупроводниковый диод, выпрямительные свойства которого основаны на использовании выпрямляющего электрического перехода между металлом и полупроводником.

Диоды с барьером Шоттки построены на переходе металл-полупроводник. Они имеют малое падение напряжения, практическое отсутствие заряда восстановления и ток через переход обусловлен одним типом носителей, поэтому это быстродействующие приборы (до 20ГГц). Их используют в качестве импульсных и высокочастотных диодов. Прямая ветвь ВАХ диодов Шоттки представляет собой идеальную экспоненту, поэтому их используют в качестве логарифмирующих диодов.

Одним из основных параметров импульсного диода является время восстановления обратного сопротивления  $t_{вос}$ , равное интервалу времени от момента прохождения тока через нуль после переключения диода с заданного прямого тока в состояние заданного обратного напряжения до момента достижения обратным током заданного низкого значения. По значению этого параметра все импульсные диоды подразделяют на шесть групп, характеризующихся временем восстановления обратного сопротивления более 500 нс, 150...500, 30...150, 5...30, 1...5 и менее 1 нс.

Диоды Шоттки применяют в выпрямителях больших токов (десятки - сотни А) при частотах выпрямления до 300МГц.

Диоды имеют малое падение напряжения (0,25...0,5 В) по сравнению с кремниевыми диодами (0,7...1,4 В).

Недостатки: сравнительно небольшое обратное напряжение ( $U_{обр} < 250В$ ) и большие обратные токи.

Диоды Шоттки используются для создания высокоскоростных логических элементов и в импульсных источниках питания. Обозначение диода Шоттки на электрических схемах показано на рис. 2.6.

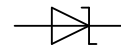


Рис. 2.6. УГО диода Шоттки

**Основное назначение выпрямительных диодов** – это построение выпрямителей вторичных источников питания. Выпрямителем называется устройство, предназначенное для преобразования переменного напряжения в постоянное. В состав выпрямителя могут входить: силовой трансформатор, выпрямительное устройство, фильтр и стабилизатор напряжения.

Трансформатор выполняет следующие функции: преобразует величину напряжения сети, обеспечивает гальваническую изоляцию нагрузки от силовой сети, преобразует количество фаз силовой сети. В импульсных источниках питания трансформатор обычно отсутствует, так как его функции выполняет высокочастотный инвертор.

Выпрямитель выполняет функцию сохранения направления тока в нагрузке при изменении полярности приложенного напряжения.

Для подавления пульсаций выпрямленного напряжения и тока применяют различные фильтры. Очень часто такой фильтр – это просто один конденсатор, подключенный параллельно нагрузке. Для подавления пульсаций тока нагрузки последовательно с ней включают катушку индуктивности. Этот способ применяется реже. Бывают также сложные LC-фильтры, полученные соединением нескольких катушек и конденсаторов. Фильтры не только подавляют пульсации напряжения и тока нагрузки, но также увеличивают действующее и среднее значение напряжения и тока нагрузки.

Стабилизатор напряжения предназначен для уменьшения влияния внешних воздействий на выходное напряжение выпрямителя. Это могут быть изменения напряжения питающей сети, температуры окружающей среды, изменения нагрузки и т.д.

Простейшая схема для выпрямления переменного тока показана на рис. 2.7, а. В ней последовательно соединен источник переменного напряжения – трансформатор, диод  $VD$  и нагрузочный резистор  $R_H$ . Эта схема называется *однополупериодной*.

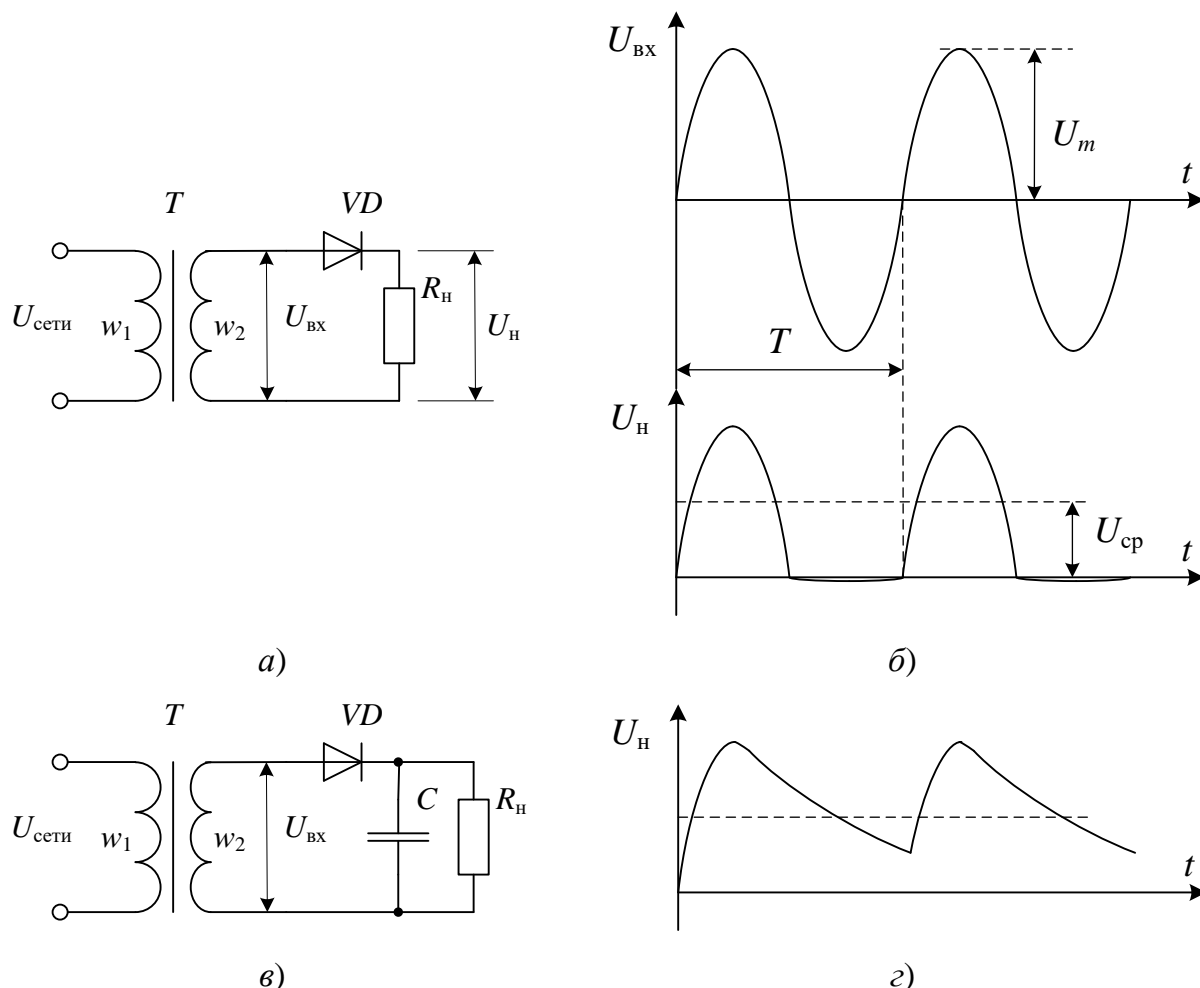


Рис. 2.7. Однополупериодный выпрямитель.

Работа простейшего выпрямителя происходит следующим образом. В течение одного полупериода напряжение для диода является прямым и проходит ток, создающий на резисторе  $R_H$  падение напряжения  $U_H$ . Амплитуда положительных полуволн на диоде очень мала. Для обычных полупроводниковых диодов прямое напряжение не более 1...2В. В течение следующего полупериода напряжение является обратным, тока практически нет и  $U_H$  близко к нулю. Все напряжение источника приложено к диоду и является для него обратным напряжением. Таким образом, максимальное значение обратного напряжения равно амплитуде  $U_{\text{вх}}$ .



Таким образом, через диод, нагрузочный резистор проходит пульсирующий ток в виде импульсов, длящихся полпериода. Этот ток называют выпрямленным током. Он создает на резисторе  $R_n$  выпрямленное напряжение (рис. 2.7, б).

Основные параметры выпрямителя:

– действующее значение входного напряжения

$$U_{\text{вх}} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \approx 0,707U_m, \text{ где } U_m \text{ – амплитуда входного напряжения;}$$

– среднее значение выпрямленного напряжения

$$U_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} U_m \sin \omega t dt = \frac{U_m}{\pi} \approx 0,318U_m, \text{ или } U_{\text{ср}} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_{\text{вх}} \approx 0,45U_{\text{вх}};$$

– среднее значение выпрямленного тока  $I_{\text{ср}} = \frac{0,45U_{\text{вх}}}{R_n}$ ;

– действующее значение тока во вторичной обмотке трансформатора:  $I_2 \approx 1,57I_{\text{ср}}$ ;

– коэффициент пульсаций, равный отношению амплитуды основной гармоники к среднему значению выпрямленного напряжения

$$\rho = \frac{U_{m1}}{U_{\text{ср}}} = \frac{\pi}{2} \approx 1,57.$$

К достоинствам схемы можно отнести простоту конструкции. Недостатки – большие пульсации, малые значения выпрямленного тока и напряжения, низкий КПД. Применяется такая схема для питания низкоомных нагрузок, некритичных к высоким пульсациям.

Для подавления пульсаций выпрямленного напряжения и тока в схеме параллельно нагрузке подключают конденсатор фильтра  $C$  (рис. 2.7, в).

Во время нарастания напряжения источник питает нагрузку и заряжает конденсатор. Снижение напряжения происходит по экспоненте. В это время диоды закрыты, и конденсатор разряжается на сопротивление нагрузки (рис. 2.7, г).

Более широкое применение нашли *двухполупериодные* выпрямители.

Схема выпрямления с выводом от средней точки трансформатора показана на рис. 2.8.

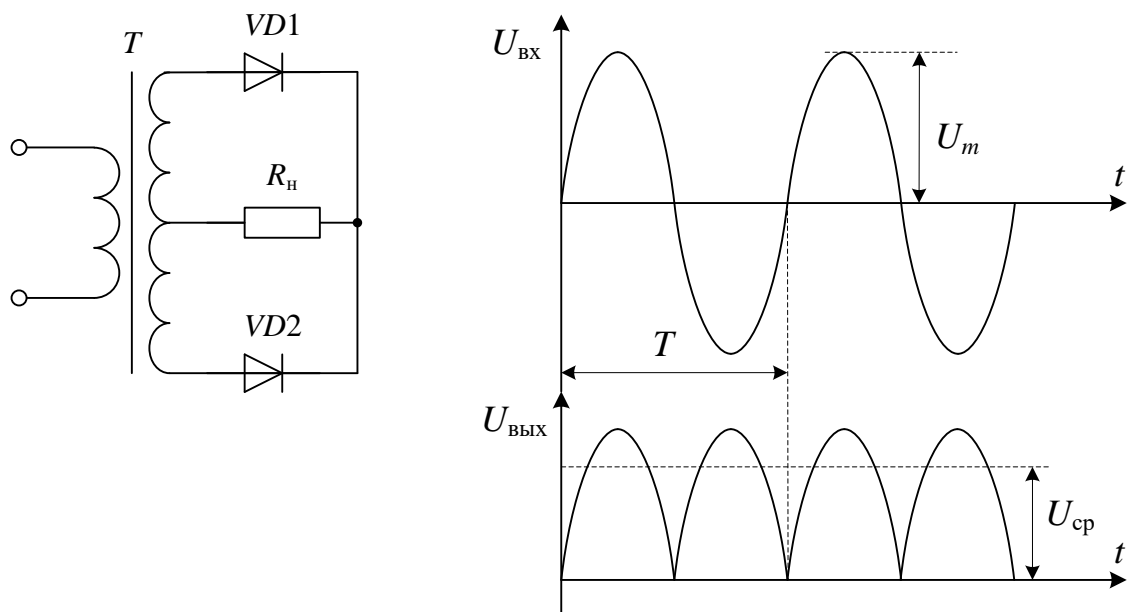


Рис. 2.8. Двухполупериодный выпрямитель с выводом от средней точки

Во время первого полупериода первый диод открыт и на нагрузке создается падение напряжения. Во время второго полупериода первый диод закрывается, поскольку оказывается включенным в обратном направлении, а второй, наоборот, открывается и на нагрузке снова выделяется положительная полувольтна. Частота пульсаций двухполупериодного выпрямителя вдвое больше, что является его достоинством. Для такой схемы характерны следующие параметры:

$$U_{\text{ср}} = 0.9U_{\text{вх}};$$

$$U_{\text{вх}} = 1.11U_{\text{ср}};$$

$$I_{\text{ср}} = 0.9U_{\text{вх}}/R_{\text{н}};$$

$$I_2 = 0.78I_{\text{ср}};$$

$$p = 0.67;$$

Достоинства: удвоенные значения  $U_{\text{ср}}$  и  $I_{\text{ср}}$ , вдвое меньший коэффициент пульсаций по сравнению с однополупериодной схемой. Недостатки: наличие трансформатора с двумя симметричными обмотками (что увеличивает его массогабаритные показатели). К тому же на диодах удвоенное обратное напряжение.

Применение фильтров также позволяет снизить коэффициент пульсаций.

Мостовая схема показана на рис. 2.9.

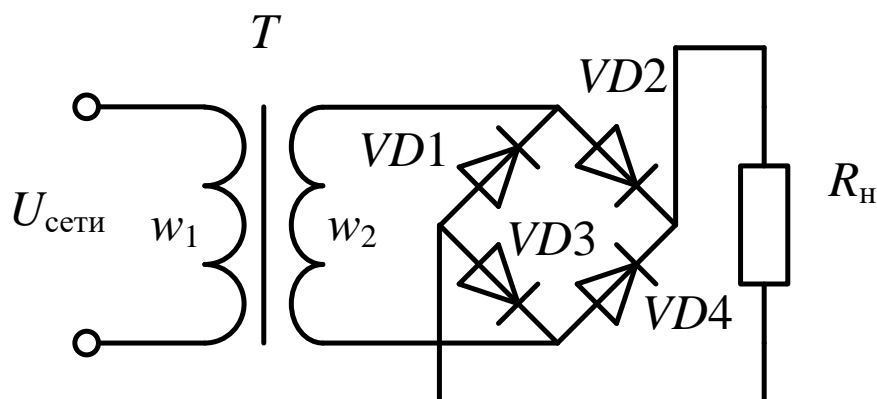


Рис. 2.9. Мостовая схема выпрямителя

Параметры такие же, как и двухполупериодной схемы со средним выводом, кроме обратного напряжения (оно в два раза меньше). Положительная полуволна (с верхнего по схеме вывода трансформатора) проходит через диод  $VD2$ , затем через нагрузку, затем через  $VD3$  ко второму выводу трансформатора. При смене направления тока работают диоды  $VD4$ ,  $VD1$ . Недостатком схемы считается удвоенное число диодов.

*Трехфазные* схемы выпрямления часто применяются для получения напряжения большой мощности. Наиболее распространены следующие схемы:

1. Трехфазная однополупериодная схема выпрямления с нулевым выводом (схема Миткевича, рис. 2.10).

Каждая фаза смещена относительно другой на угол  $120^\circ$ . На нагрузке работает та фаза, у которой больше значение положительной полуволны в данный момент времени. В схеме диоды используются в течение  $1/3$  периода. При этом необходимо наличие средней точки. Среднее значение выпрямленного напряжения  $U_{\text{ср}} = 1.17U_{\text{вх}}$ , обратное напряжение  $U_{\text{обр.мах}} = 2.1U_{\text{ср}}$ , коэффициент пульсаций 0.25.

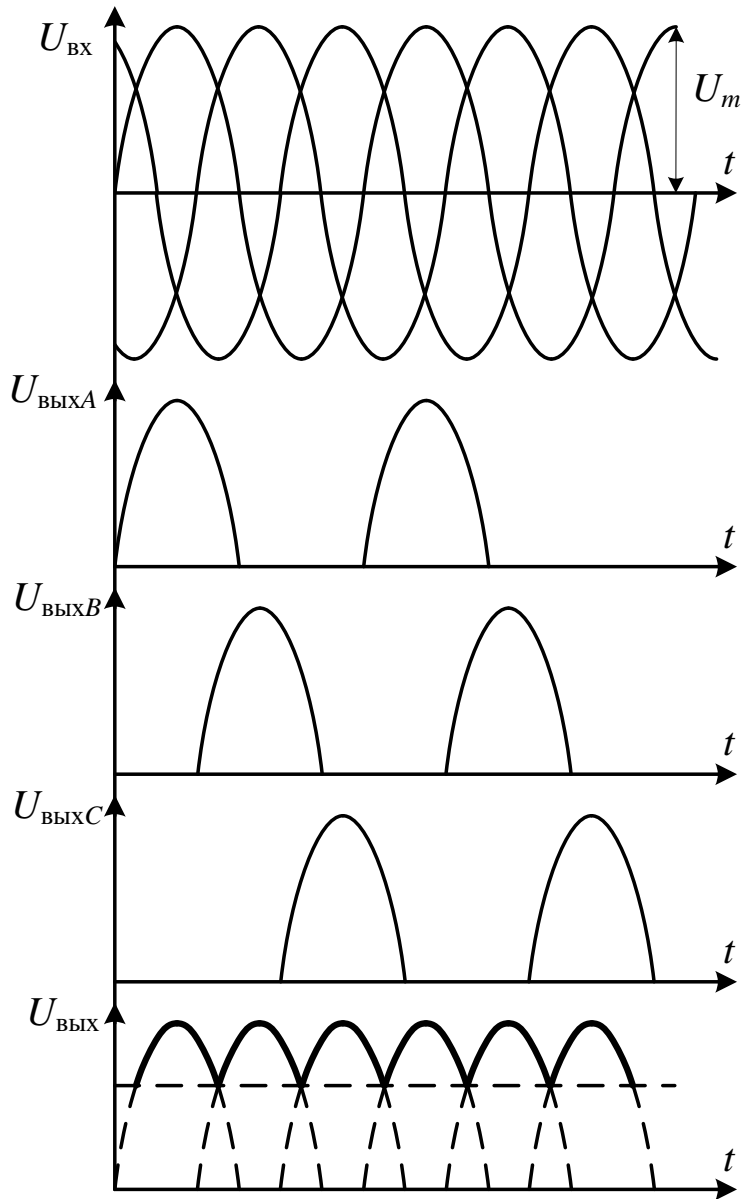
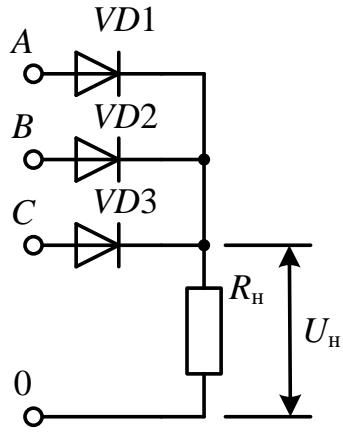


Рис. 2.10. Трехфазный выпрямитель

2. Трехфазная двухполупериодная схема выпрямления (схема Ларионова, рис. 2.11).

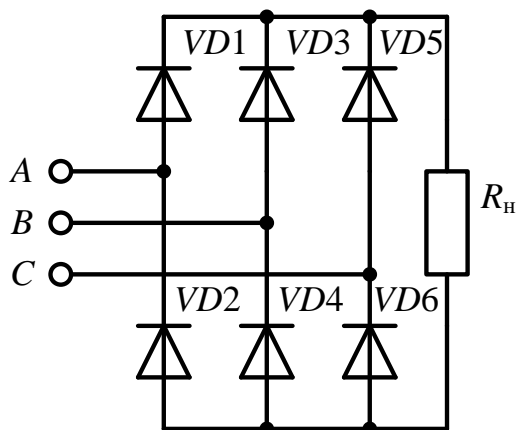


Рис. 2.11. Трехфазная двухполупериодная схема выпрямления.

По принципу действия такая схема аналогична однофазной двухполупериодной (мостовой). Для нее характерно:  $U_{\text{ср}} = 2.34U_{\text{вх}}$ ,  $U_{\text{обр.мах}} = 1.05U_{\text{ср}}$ ,  $p = 0.057$ . Находит применение при различных величинах входного напряжения и токах нагрузки в сотни Ампер. Схема экономична, имеет низкие пульсации. Однако в реальных схемах коэффициент пульсаций составляет 8-10% из-за несимметричности фазных питающих напряжений.

На рис. 2.12 показаны схемы Г – образного и П – образного LC – фильтров. Они могут применяться в сочетании с любыми выпрямителями. Они подавляют пульсации выпрямленного напряжения лучше, чем один конденсатор, но катушки индуктивности довольно тяжелы и громоздки, поэтому такие фильтры применяются только при необходимости.

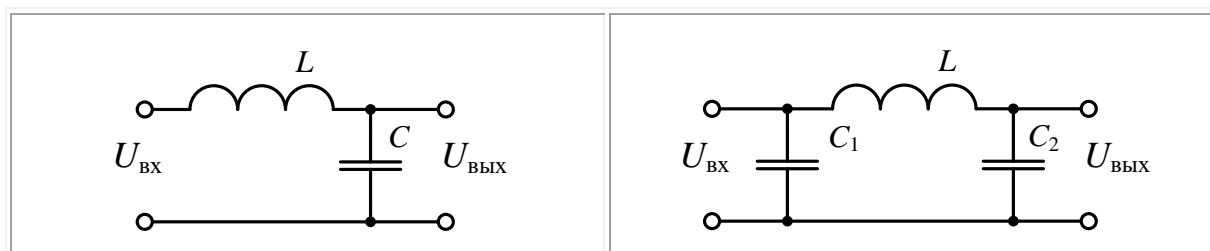


Рис. 2.12. LC – фильтры

### 2.1.3. Импульсные диоды

Импульсный полупроводниковый диод — это полупроводниковый диод, имеющий малую длительность переходных процессов и предназначенный для применения в импульсных режимах работы.

Импульсные диоды предназначены для работы в высокочастотных и импульсных схемах.

При подаче входного напряжения  $U_{вх} > 0$  диод открывает и через него протекает прямой ток  $I_{пр} = \frac{U_m}{R_H}$  (рис. 2.13).

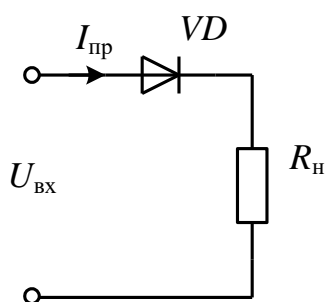


Рис. 2.13. Схема включения диода

После подачи запирающего напряжения диод остается в проводящем состоянии и через него протекает обратный ток, величина которого определяется внешней цепью:  $I_{m\text{обр}} = -\frac{U_m}{R_H}$ .

Через короткое время ( $t_{рас}$  — время рассасывания) переход начинает запирается и в течение времени спада  $t_{сп}$  обратный ток экспоненциально спадает до установившегося значения  $I_{обр\text{уст}}$ .

Таким образом, при изменении полярности входного напряжения на противоположную ( $U_{вх} < 0$ ), обратную для диода, последний запирается, но не мгновенно, а в течение некоторого времени — времени восстановления  $t_{вос} = t_{рас} + t_{сп}$  (рис. 2.14).

Переходный процесс, в течение которого обратное сопротивление полупроводникового диода  $R_{обр}$  восстанавливается до постоянного значения после быстрого переключения с прямого направления на обратное, называют временем восстановления  $t_{вос}$  обратного сопротивления диода.

Главная причина возникновения обратного импульса — разряд диффузионной емкости. Накопленный заряд мгновенно исчезнуть не может, на это требуется время — время на рассасывание зарядов, образованных подвижными носителями. Это время называется  $t_{рас}$  — время рассасывания.

Работу импульсных диодов характеризуют также:  $U_{пр и}$  – импульсным прямым напряжением;  $I_{пр и}$  – импульсным прямым током.

Следовательно, одним из основных параметров импульсного диода является время восстановления  $t_{вос}$  обратного сопротивления, равное интервалу времени от момента прохождения тока через нуль после переключения диода с заданного прямого тока в состояние заданного обратного напряжения до момента достижения обратным током заданного низкого значения. Время восстановления определяет максимальную рабочую частоту диода. По значению этого параметра все импульсные диоды подразделяют на шесть групп, характеризующихся временем восстановления обратного сопротивления более 500 нс, 150...500, 30...150, 5...30, 1...5 и менее 1 нс (см. таблицу 2.1).

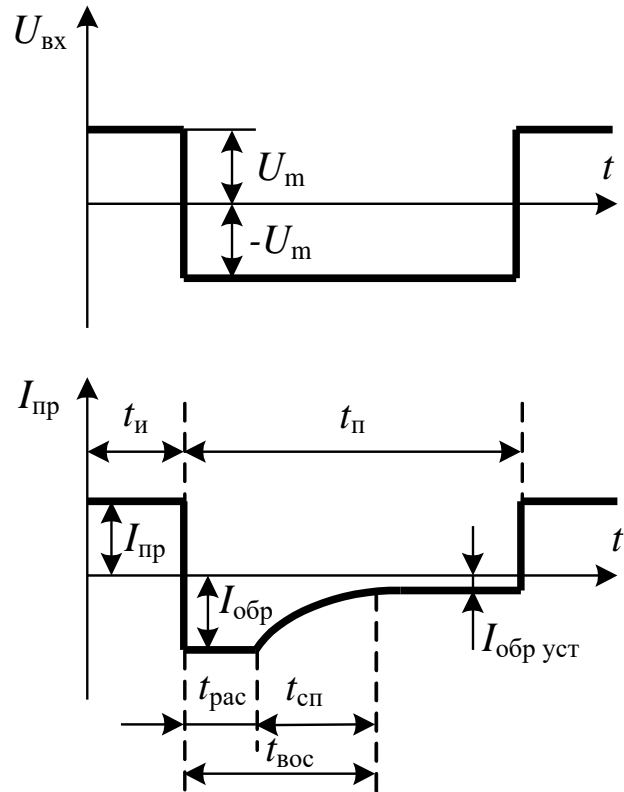


Рис. 2.14. Временная диаграмма

более 500 нс, 150...500, 30...150, 5...30, 1...5 и менее 1 нс (см. таблицу 2.1).

#### 2.1.4. Стабилитроны и стабисторы

Полупроводниковый стабилитрон – это полупроводниковый диод, напряжение на котором в области электрического пробоя слабо зависит от тока и который используется для стабилизации напряжения.

В полупроводниковых стабилитронах используется свойство незначительного изменения обратного напряжения на  $p-n$  переходе при электрическом (лавинном или туннельном) пробое. Это связано с тем, что небольшое увеличение напряжения на  $p-n$  переходе в режиме электрического пробоя вызывает более интенсивную генерацию носителей заряда и значительное увеличение обратного тока.

Низковольтные стабилитроны изготавливают на основе сильнолегированного (низкоомного) материала. В этом случае образуется узкий плоскостный переход, в котором при сравнительно низких обратных напряжениях (менее 6В) возникает туннельный электрический пробой. Высоковольтные стабилитроны изготавливают на основе слаболегированного (высокоомного) материала. Поэтому их принцип действия связан с лавинным электрическим пробоем.

*Основные параметры стабилитронов:*

– напряжение стабилизации  $U_{ст}$  – значение напряжения на стабилитроне при прохождении заданного тока стабилизации ( $U_{ст} = 1 \dots 1000В$ );

–  $\Delta U_{ст}$  – изменение напряжения стабилизации;

– минимальный  $I_{ст\ min}$  и максимальный  $I_{ст\ max}$  токи стабилизации ( $I_{ст\ min} = 1,0 \dots 10mA$ ,  $I_{ст\ max} = 0,05 \dots 2,0A$ );

–  $I_{ст\ ном}$  – номинальный ток стабилизации, определяемый в соответствии с выражением  $I_{ст\ ном} = (I_{ст\ max} + I_{ст\ min}) / 2$ ;

– максимально допустимая рассеиваемая мощность  $P_{max}$ ;

– дифференциальное сопротивление на участке стабилизации  $R_d = \frac{\Delta U_{ст}}{\Delta I_{ст}}$ , ( $R_d = 0,5 \dots 200\Omega$ );

– температурный коэффициент напряжения на участке стабилизации:  $TKU = \frac{\Delta U_{ст}}{\Delta T U_{ст}} \cdot 100\%$ .

TKU стабилитрона показывает на сколько процентов изменится стабилизирующее напряжение при изменении температуры полупроводника на  $1^\circ C$  ( $TKU = -0,5 \dots +0,2\% / ^\circ C$ ).

Стабилитроны используют для стабилизации напряжений источников питания, а также для фиксации уровней напряжений в различных схемах. Для стабилизации напряжения больше трех вольт используют обратную ветвь вольтамперной характеристики.

Вольтамперная характеристика (обратная ветвь) стабилитрона изображена на рис. 2.15.



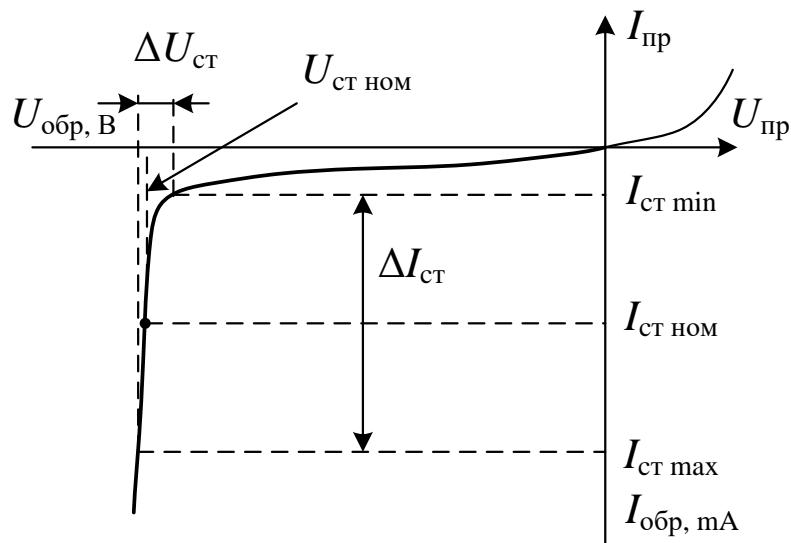


Рис. 2.15. Вольтамперная характеристика стабилитрона

Стабилитроны обеспечивают диапазон напряжений стабилизации от 3 до 200 В. Их прямое напряжение составляет  $\approx 0,6$  В. Как видно из рис.1.8, обратное сопротивление диода при малых обратных напряжениях ( $U_{обр} < U_{ст}$ ) велико, а, следовательно, обратный ток имеет малое значение. При достижении напряжения стабилизации обратный ток резко возрастает. Эффект стабилизации основан на том, что большое изменение обратного тока вызывает малое изменение напряжения. Стабилизация тем лучше, чем круче идет кривая и соответственно чем меньше дифференциальное внутреннее сопротивление.

Стабилизацию низковольтного напряжения в пределах 0,3...1 В можно получить при использовании прямой ветви ВАХ кремниевых диодов. Диод, в котором для стабилизации напряжения используется прямая ветвь ВАХ, называют *стабистором*. Существуют также двухсторонние (симметричные) стабилитроны, имеющие симметричную ВАХ относительно начала координат. С их помощью можно стабилизировать переменное напряжение. Условное графическое обозначение стабилитронов показано на рис. 2.16.

Стабилитроны допускают последовательное включение, при этом результирующее стабилизирующее напряжение равно сумме напряжений стабилизации стабилитронов:  $U_{ст} = U_{ст1} + U_{ст2} + \dots$

Параллельное соединение стабилитронов недопустимо, т.к. из-за разброса характеристик и параметров из всех параллельно соединенных стабилитронов ток будет возникать только в одном, имеющем наименьшее стабилизирующее напряжение  $U_{ст}$ , что вызовет перегрев стабилитрона.



а) Несимметричный стабилитрон      б) Симметричный стабилитрон

Рис. 2.16. Условное графическое обозначение стабилитронов

Кремниевые стабилитроны и стабисторы обозначаются буквами КС или цифрой вместо К (например, 2С) – кремниевые стабилитроны и стабисторы (см. таблицу 2.1).

После этих обозначений стоит три цифры, если это первые цифры: 1 или 4, то взяв последние две цифры и разделив их на 10 получим напряжение стабилизации  $U_{ст}$ .

Например:

КС107А – стабистор,  $U_{ст} = 0,7$  В,

2С133А – стабилитрон,  $U_{ст} = 3,3$  В.

Если первая цифра 2 или 5, то последние две цифры показывают  $U_{ст}$ , например:

КС213Б –  $U_{ст} = 13$  В,

2С291А –  $U_{ст} = 91$  В.

Если цифра 6, то к последним двум цифрам нужно прибавить 100 В, например: КС680А –  $U_{ст} = 180$  В.

При построении стабилизаторов напряжения стабилитрон включается в обратной полярности параллельно нагрузке, последовательно с ним включается ограничительный резистор  $R_{огр}$  (рис. 2.17).

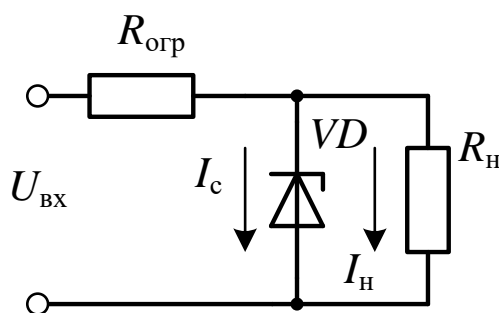


Рис. 2.17. Стабилизатор напряжения

Уменьшение сопротивления  $R_{огр}$  увеличивает напряжение на нагрузке, но ухудшает стабилизацию.

Параметры схемы выбирают так, чтобы при изменении нагрузки и напряжения источника питания выполнялись неравенства (1) и (2).

$$I_{ст\ min} \leq \frac{U_{вх\ min} - U_{ст}}{R_{огр}} - I_{н\ max} ; I_{ст\ max} \geq \frac{U_{вх\ max} - U_{ст}}{R_{огр}} - I_{н\ min} .$$

### 2.1.5. Туннельные и обращенные диоды

Принцип действия основан на явлении туннельного эффекта, открытого в 1920-х годах Олегом Лосевым. Дальнейшее развитие получил в 1958 благодаря Лео Эсаки. Туннельный эффект заключается в переходе через потенциальный барьер электронов с уровнем энергии меньше высоты потенциального барьера, при этом электроны своей энергии не теряют.

Туннельный диод – это полупроводниковый диод на основе вырожденного полупроводника, в котором туннельный эффект приводит к появлению на вольтамперной характеристике при прямом напряжении участка отрицательного дифференциального сопротивления (рис. 2.18).

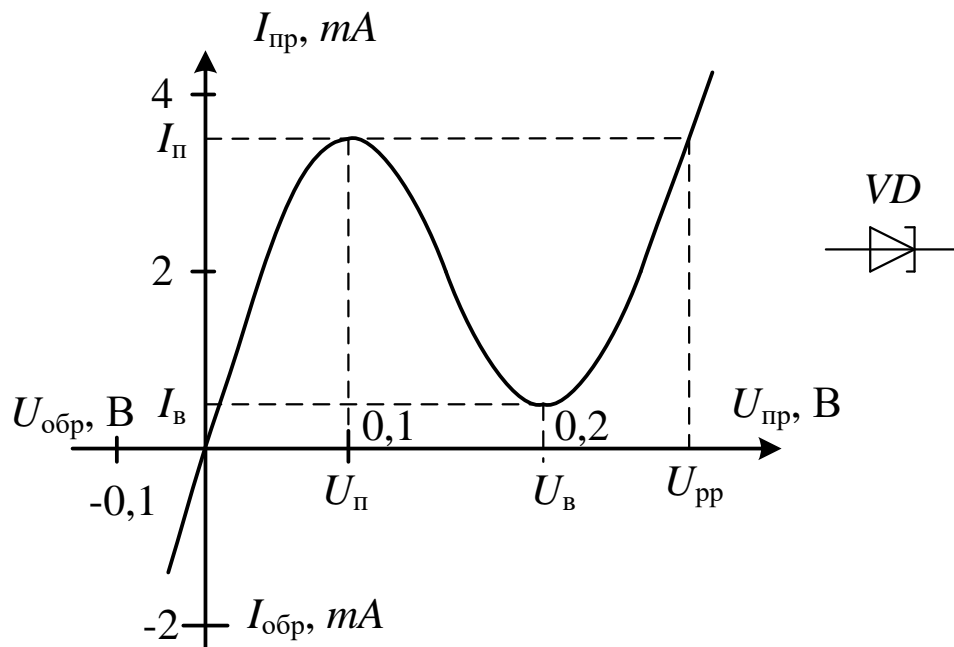


Рис. 2.18. Вольтамперная характеристика и УГО туннельного диода

В зависимости от назначения туннельные диоды разделяют на усилительные, генераторные и переключательные [6].

Туннельный диод изготавливается из германия или арсенида галлия с очень большой концентрацией примесей, т.е. с очень малым удельным сопротивлением. Такие полупроводники с малым сопротивлением называют вырожденными. Это позволяет получить очень узкий  $p$ - $n$  переход. В таких переходах возникают условия для относительно свободного туннельного прохождения электронов через потенциальный барьер (туннельный эффект). Туннельный эффект состоит в том, что при достаточно малой высоте потенциального барьера возможно проникновение электронов через барьер без изменения их энергии.

Основные параметры туннельных диодов:

- пиковый ток  $I_{\Pi}$  – прямой ток в точке максимума ВАХ;
- ток впадины  $I_{\text{В}}$  – прямой ток в точке минимума ВАХ;
- отношение токов туннельного диода  $I_{\Pi} / I_{\text{В}}$ ;
- напряжение пика  $U_{\Pi}$  – прямое напряжение, соответствующее пиковому току;
- напряжение впадины  $U_{\text{В}}$  – прямое напряжение, соответствующее току впадины;
- напряжение раствора  $U_{\text{рр}}$ .

Туннельные диоды обладают малой емкостью перехода (доли единицы пФ) и используются для генерации и усиления электромагнитных колебаний, а также в быстродействующих переключающих и импульсных схемах на частотах  $1 \dots 100$  ГГц.

*Обращенный* диод – диод на основе полупроводника с критической концентрацией примесей, в котором проводимость при обратном напряжении вследствие туннельного эффекта значительно больше, чем при прямом напряжении.

Принцип действия обращенного диода основан на использовании туннельного эффекта. Но в обращенных диодах концентрацию примесей делают меньше, чем в обычных туннельных. Поэтому контактная разность потенциалов у обращенных диодов меньше, а толщина  $p$ - $n$  перехода больше. Это приводит к тому, что под действием прямого напряжения прямой туннельный ток не создается. Прямой ток в обращенных диодах создается инжекцией не основных носите-

лей зарядов через  $p$ - $n$  переход, т.е. прямой ток является диффузионным. При обратном напряжении через переход протекает значительный туннельный ток, создаваемый перемещением электронов сквозь потенциальный барьер из  $p$ -области в  $n$ -область. Рабочим участком ВАХ (рис. 2.19) обращенного диода является обратная ветвь.

Таким образом, обращенные диоды обладают выпрямляющим эффектом, но пропускное (проводящее) направление у них соответствует обратному включению, а запирающее (непроводящее) – прямому включению.

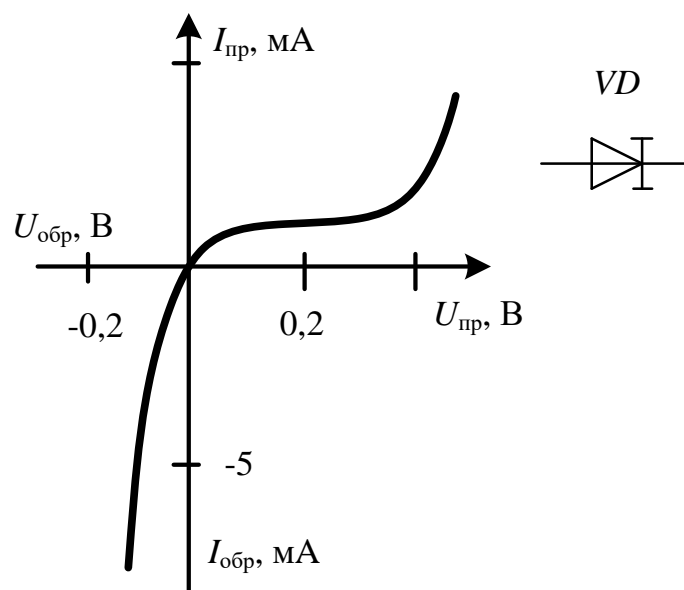


Рис. 2.19. Вольтамперная характеристика обращенного диода

Обращенные диоды применяют в импульсных устройствах, а также в качестве преобразователей сигналов (смесителей и детекторов) в радиотехнических устройствах.

### 2.1.6. Варикапы

Варикап – это полупроводниковый диод, в котором используется зависимость емкости от величины обратного напряжения и который предназначен для применения в качестве элемента с электрически управляемой емкостью.

Вольтфарадная характеристика варикапа приведена на рис. 2.20.

Полупроводниковым материалом для изготовления варикапов является кремний.

Основные параметры варикапов:

– номинальная емкость  $C_B$  – емкость при заданном обратном напряжении ( $C_B = 10 \dots 500$  пФ);

– коэффициент перекрытия по емкости  $K_C = \frac{C_{max}}{C_{min}}$ ; ( $K_C = 5 \dots 20$ );

– отношение емкостей варикапа при двух заданных значениях обратных напряжений.

Варикапы широко применяются в различных схемах для автоматической подстройки частоты, в параметрических усилителях.

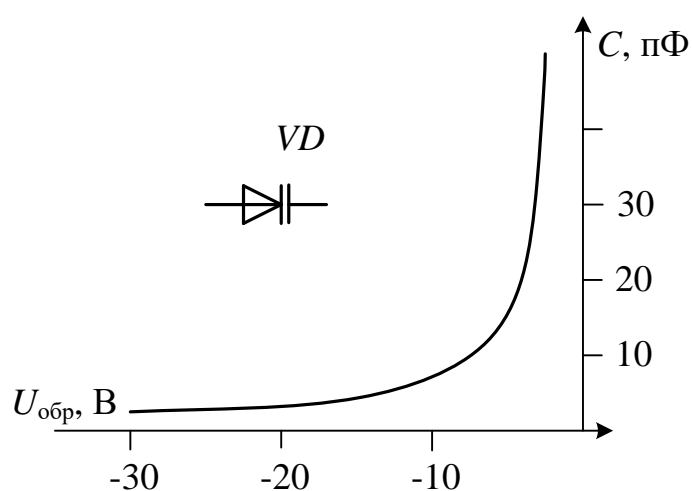


Рис. 2.20. Вольтфарадная характеристика варикапа

### 2.1.7. Тиристоры

Тиристором называется полупроводниковый прибор многослойной структуры с тремя и более  $p-n$  переходами, вольтамперная характеристика которого имеет участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Может переключаться из закрытого состояния в открытое или наоборот. Важнейшее свойство тиристоров – два устойчивых состояния его работы. Первое состояние характеризуется малым прямым током, протекающим через структуру, и большим падением напряжения на ней. Второе состояние соответствует большому прямому току и малому падению напряжения между выходными электродами.

По устройству и принципу действия тиристоры подразделяются на *диодные тиристоры (динисторы)*, *триодные тиристоры (тринисторы)* и *симметричные тиристоры (симисторы)*.

- а) диодный тиристор (динистор);
- б) диодный симметричный тиристор;
- в) триодный незапираемый тиристор с управлением по аноду;
- г) триодный незапираемый тиристор с управлением по катоду;
- д) запираемый тиристор с управлением по аноду;
- е) запираемый тиристор с управлением по катоду;
- ж) триодный симметричный незапираемый тиристор с управлением по аноду.

Максимально допустимые токи в открытом состоянии для различных тиристоров имеют значения от 40 мА до 1000 А. При этом напряжение в открытом состоянии обычно не превосходит 2 В.

Общим признаком для всех тиристоров является нелинейная вольтамперная характеристика с участком отрицательного сопротивления, что обуславливает регенеративный процесс в приборе при переходе его из запертого в открытое состояние. Предпочтительным материалом для изготовления тиристоров считается кремний.

### ***Диодные тиристоры (динисторы).***

Структура диодного тиристора и его условное обозначение показаны на рисунке 2.21. Диодный тиристор – это тиристор, имеющий два вывода, через которые проходит как основной ток, так и ток управления.

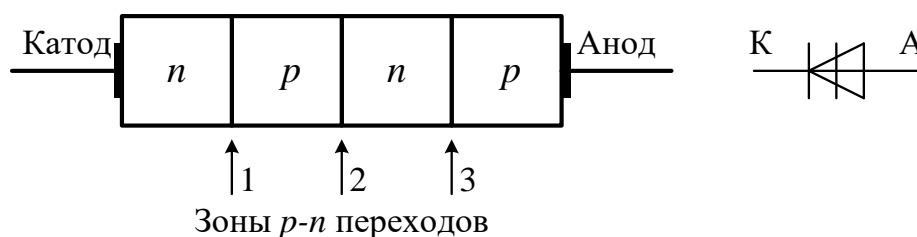


Рис. 2.21. Диодный тиристор

Структура диодного тиристора состоит из четырех областей полупроводника с чередующимся типом электропроводности. Кроме трех выпрямляющих *p-n* переходов диодный тиристор имеет два омических перехода. Один из омических переходов расположен между крайней *n*-областью и металлическим электродом, который называют катодом. Другой омический переход расположен между крайней

$p$ -областью и металлическим электродом, который называют анодом. В таком приборе существуют две эмиттерные области – крайние ( $n$ - и  $p$ -эмиттеры) и две базовые области, примыкающие к среднему переходу ( $p$ - и  $n$ -базы).

Структуру тиристора можно представить в виде схемы замещения (рис. 2.22), состоящей из транзисторов  $VT1$  и  $VT2$  типа  $n$ - $p$ - $n$  и  $p$ - $n$ - $p$ .

На рис. 2.23 изображена вольтамперная характеристика динистора. Характеристика динистора содержит основные характерные участки.

*Участок 1–2.* Напряжение на аноде положительно, ток незначителен, то есть тиристор закрыт. Этот участок тиристора аналогичен обратной ветви ВАХ  $p$ - $n$  перехода.

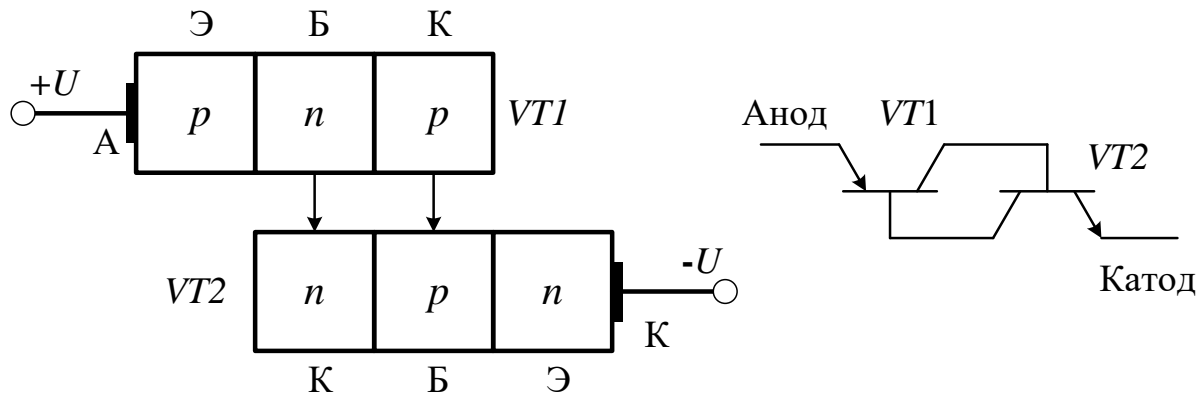


Рис. 2.22. Схема замещения диодного тиристора

*Участок 2-3.* Это участок характеристики с отрицательным дифференциальным сопротивлением тиристора. Координаты точек 2 и 3 определяют параметры тиристора:

$U_{\text{вкл}}$  – напряжение включения;

$I_{\text{вкл}}$  – ток включения;

$I_{\text{уд}}(I_{\text{выкл}})$  – ток удержания (ток выключения);

$U_{\text{уд}}(U_{\text{выкл}})$  – напряжение удержания (напряжение выключения).

Удерживающий ток тиристора – это минимальный ток, который необходим для поддержания тиристора в открытом состоянии.

*Участок 3-4.* На этом участке тиристор открыт, и ток через него ограничен сопротивлением внешней цепи. Участок соответствует режиму прямой проводимости.



Участок 1-5. На этом участке напряжение на аноде отрицательно. Ток мал. Тиристор закрыт. Участок соответствует режиму обратного запираания.

Участок 5-6. На этом участке наблюдается резкое увеличение тока тиристора при увеличении отрицательного напряжения на аноде, соответствует режиму обратного пробоя.

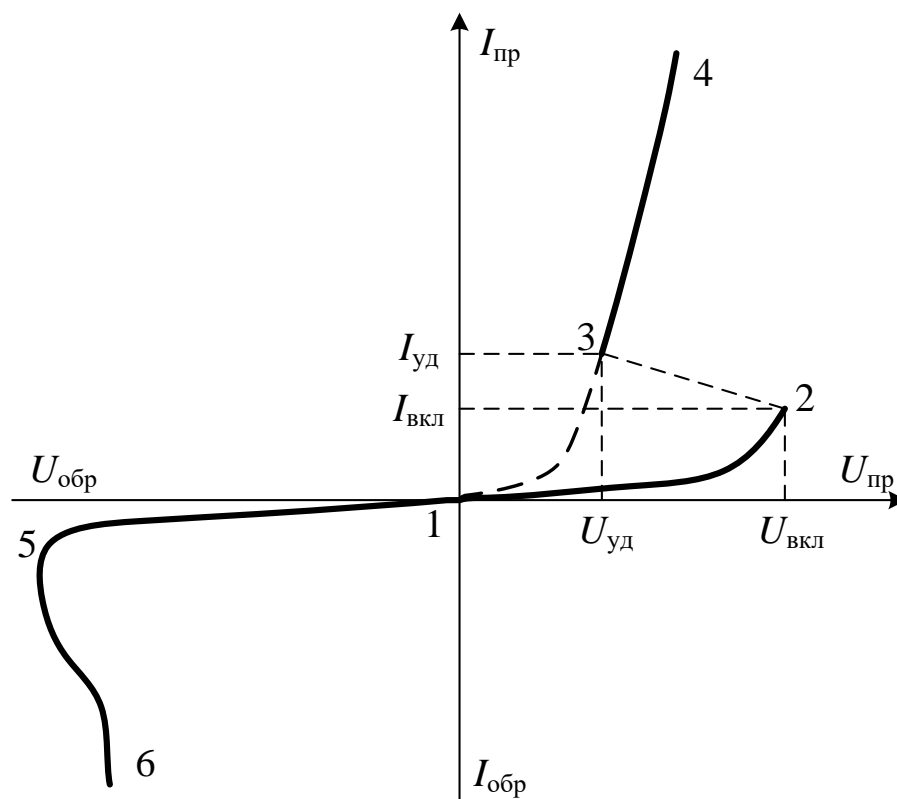


Рис. 2.23. Вольтамперная характеристика динистора

Для включения динистора необходимо увеличивать напряжение на нем до величины  $U = U_{\text{вкл}}$ . С ростом напряжения один из транзисторов будет переходить в режим насыщения. Коллекторный ток этого транзистора, протекая в цепи базы второго транзистора, откроет его, а последний в свою очередь увеличит ток базы первого. В результате коллекторные токи транзисторов будут лавинообразно нарастать, пока оба транзистора не перейдут в режим насыщения. После включения транзисторов динистор открывается, и ток будет ограничен только сопротивлением внешней цепи.

Для выключения тиристора при его использовании в качестве токового ключа необходимо каким-либо способом уменьшить ток че-

рез тиристор до значения, меньшего тока удержания, или поменять полярность напряжения на аноде.

### **Триодные тиристоры (тринисторы).**

Триодный тиристор – это тиристор, имеющий два основных и один управляющий вывод.

Управляющий вывод, называемый управляющим электродом (УЭ), соединен с базой одного из эквивалентных транзисторов. Если подать на управляющий электрод ток управления, то соответствующий транзистор открывается, что приводит к резкому возрастанию тока коллектора, который в свою очередь открывает второй транзистор. Таким образом, происходит включение тиристора.

В зависимости от расположения управляющего электрода тиристоры делятся на тиристоры с катодным управлением и тиристоры с анодным управлением. Структура тиристоров и их условное обозначение приведены на рис. 2.24.

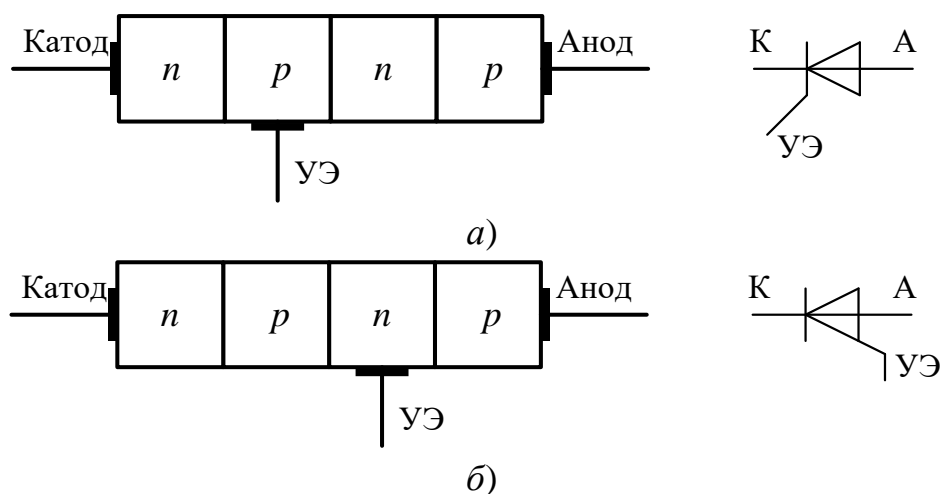


Рис. 2.24. Структура триодных тиристоров:

- а) с катодным управлением и его условное графическое обозначение*
- б) с анодным управлением и его условное графическое обозначение*

Вольтамперная характеристика тиристора приведена на рис. 2.25. Она отличается от характеристики динистора тем, что напряжение включения регулируется изменением тока в цепи управляющего электрода. При увеличении тока управления снижается напряжение включения. Поэтому триодный тиристор можно включить, т.е. переключить из закрытого состояния в открытое в необходимый момент времени даже при небольшом анодном напряжении.

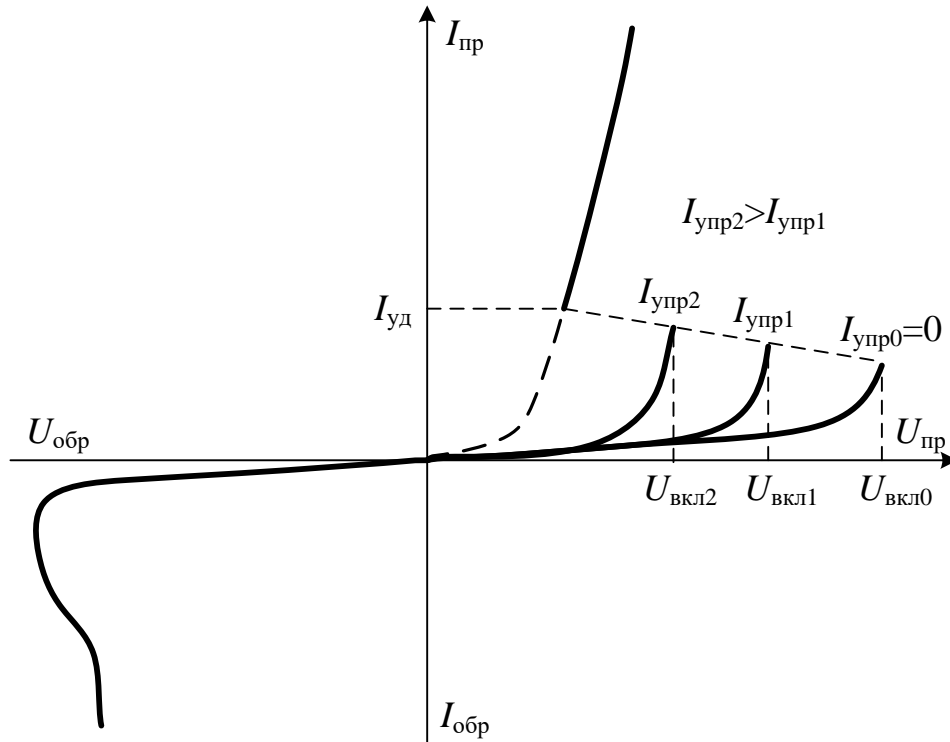


Рис. 2.25. Вольтамперная характеристика тиристора

После включения тиристора управляющий электрод теряет управляющие свойства, и, следовательно, с него можно снять напряжение управления. Таким образом, для включения тиристора на управляющий электрод достаточно подать один короткий импульс, обеспечивающий заданный ток управления. Выключить тиристор с помощью управляющего электрода нельзя. Для выключения тиристора используются такие же способы, как и для динистора. Однако существуют тиристоры, которые могут быть выключены по управляющему электроду импульсом тока обратного знака (рис. 2.26). Такие тиристоры называют запираемыми по управляющему электроду.

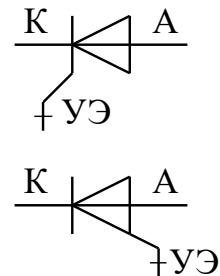


Рис. 2.26. УГО запираемых тиристоров

### ***Симметричные тиристоры (симисторы).***

Симисторы предназначены для коммутации в цепях переменного тока.

Симметричный диодный тиристор (диак) – это диодный тиристор, способный переключаться как в прямом, так и в обратном направлениях.

Симметричный триодный тиристор (триак) – это триодный тиристор, который при подаче сигнала на его управляющий электрод включается как в прямом, так и в обратном направлениях.

Структура симметричного диодного тиристора состоит из пяти областей с чередующимся типом электропроводности, которые образуют четыре  $p$ - $n$  перехода (рис. 2.27). Крайние переходы шунтированы объемными сопротивлениями прилегающих областей с электропроводностью  $p$ -типа.

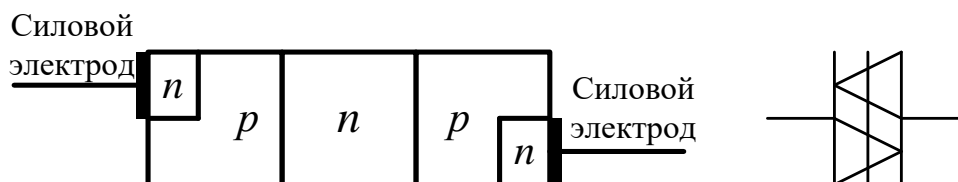


Рис. 2.27. Структура симметричного диодного тиристора

Таким образом, симметричный диодный тиристор можно представить в виде двух диодных тиристорov, включенных встречно и шунтирующих друг друга при разных полярностях приложенного напряжения. Вольтамперная характеристика такого тиристора получается одинаковой при разных полярностях приложенного напряжения (рис. 2.28).

В структуру симметричного триодного тиристора добавлен управляющий электрод, соединенный с базой одного из эквивалентных транзисторов (рис. 2.29). Симисторы способны переключаться из закрытого в открытое состояние при протекании тока через управляющий электрод, точно также, как в триодном тиристоре. Отличие состоит в том, что в открытом симисторе ток может протекать как в прямом, так и в обратном направлении.

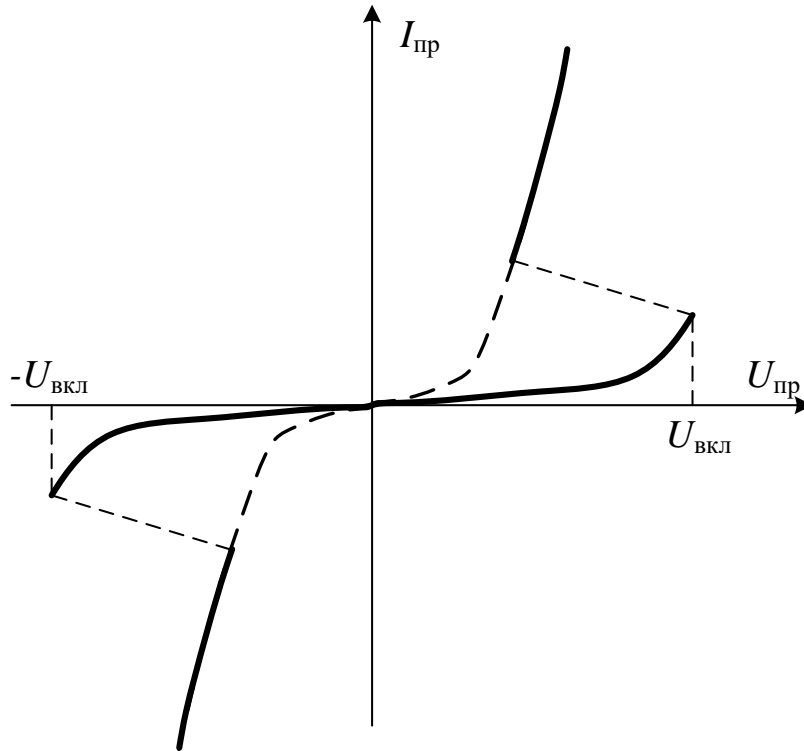


Рис. 2.28. Вольтамперная характеристика симметричного диодного тиристора

Вольтамперная характеристика такого тиристора получается одинаковой при разных полярностях приложенного напряжения.

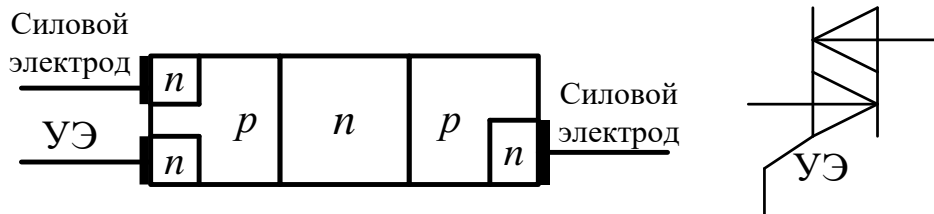


Рис. 2.29. Структура симметричного триодного тиристора

Тиристоры используются для коммутации больших токов. В устройствах связи и автоматики используются тиристоры, имеющие напряжение включения десятки и сотни вольт, остаточное напряжение на включенном приборе 1...2 В, постоянный анодный ток более 10 А при этом ток управления может составлять десятки микроампер. Мощные высоковольтные тиристоры, используемые в энергетических

установках, могут коммутировать токи до 1000 А при напряжениях до 100 кВ. Единственная область, в которой тиристоры продемонстрировали высокую конкурентоспособность – это мощные токовые ключи различного назначения, в качестве которых они сейчас успешно и широко используются.

### *Способы управления тиристорами*

#### *Включение тиристоров*

1. Включение тиристора путем медленного увеличения напряжения между основными электродами до напряжения включения  $U_{\text{вкл}}$ .
2. Включение тиристора с помощью тока управления.
3. Включение тиристора путем быстрого увеличения напряжения между основными электродами.
4. Включение тиристора путем освещения кристалла с тиристорной структурой (оптронные тиристоры).

#### *Выключение тиристоров*

1. Выключение тиристора путем уменьшения тока в цепи основных электродов до значения, меньшего удерживающего тока, или путем разрыва цепи основных электродов. Второй способ выключения применяется, когда время выключения тиристора не влияет на работу той или иной схемы.
2. Выключение тиристора путем изменения полярности анодного напряжения.
3. Выключение тиристора с помощью тока управляющего электрода (только для запираемых тиристоров).

Напомним, что второй знак при маркировке тиристоров – это буква «Н», обозначающая динисторы и неуправляемые тиристоры, например, КН102, и буква «У», обозначающая тринисторы и управляемые тиристоры.

## 2.2. Полупроводниковые транзисторы

Транзистор – электронный полупроводниковый прибор, в котором ток в цепи двух электродов управляется третьим электродом.

Первыми были изобретены полевые транзисторы (1928 год), а биполярные появились в 1947 году в лаборатории Bell Labs. И это была, без преувеличения, революция в электронике. Очень быстро транзисторы заменили вакуумные лампы в различных электронных устройствах. В связи с этим возросла надежность таких устройств, и намного уменьшились их размеры. Справедливости ради заметим, что лампы применяются и до сих пор, но в очень и очень узком сегменте аппаратуры специального назначения.

Любая микросхема, содержит в себе множество транзисторов (а также диодов, конденсаторов, резисторов и др.). Изначально «транзисторами» называли резисторы, сопротивление которых можно было изменять с помощью величины подаваемого напряжения. Если отвлечься от физики процессов, то современный транзистор тоже можно представить как сопротивление, зависящее от подаваемого на него сигнала. Отличие между полевыми и биполярными транзисторами заключается в следующем. В биполярном транзисторе в переносе заряда участвуют и электроны, и дырки, а в полевом (он же униполярный) – или электроны, или дырки. В биполярных транзисторах выходными параметрами управляет ток, а в полевых – электрическое поле. Также эти типы транзисторов разнятся по областям применения. Биполярные используются в основном в аналоговой технике, а полевые – в цифровой. Основная область применения любых транзисторов – усиление слабого сигнала за счет дополнительного источника питания.

### 2.2.1. Биполярные транзисторы

Биполярный транзистор – это полупроводниковый прибор с двумя взаимодействующими между собой  $p-n$  переходами и тремя или более выводами. Полупроводниковый кристалл транзистора состоит из трех областей с чередующимися типами электропроводности, между которыми находятся два  $p-n$  перехода. Средняя область обычно выполняется очень тонкой (доли микрона), поэтому  $p-n$  переходы близко расположены один от другого.

В зависимости от порядка чередования областей полупроводника с различными типами электропроводности различают транзисторы  $p-n-p$  и  $n-p-n$  типов. Область транзистора, расположенную между  $p-n$  переходами, называют базой. База необходима для подачи управляющего напряжения. Эмиттер, предназначается для переноса заряженных частиц в базу. Эмиттер выполняет функцию генератора носителей заряда, которые формируют рабочий ток. Коллектор, имеет тип проводимости, одинаковый с эмиттером, предназначен для сбора зарядов, поступивших с эмиттера.

Концентрация примесей (а, следовательно, и основных носителей зарядов) в эмиттере существенно больше, чем в базе и больше, чем в коллекторе. Поэтому эмиттерная область самая низкоомная.

Биполярный транзистор является наиболее распространенным активным полупроводниковым прибором. В качестве основного материала для изготовления биполярных транзисторов в настоящее время используется кремний. При этом преимущественно изготавливают транзисторы  $n-p-n$ -типа, в которых основными носителями заряда являются электроны, имеющие подвижность в два-три раза выше, чем подвижность дырок.

Упрощенные структуры и условные графические обозначения разных типов транзисторов показаны на рис. 2.30.

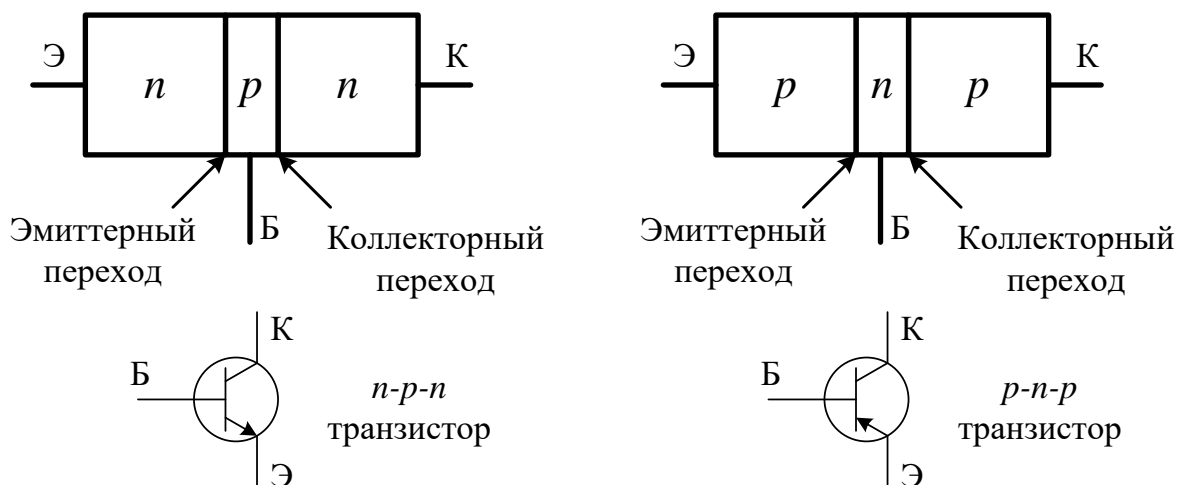


Рис. 2.30. Структуры и условные графические обозначения транзисторов



Каждый из  $p-n$  переходов может быть смещен либо в прямом, либо в обратном направлении. В зависимости от этого различают четыре режима работы транзистора.

### ***Активный режим***

В этом режиме (для транзистора  $n-p-n$  типа) на эмиттерный переход подается прямое напряжение (переход открыт), а на коллекторный – обратное (переход закрыт). Как следствие, в транзисторе начинают протекать токи коллектора и базы. Значение коллекторного тока вычисляется как арифметическое произведение величины тока базы и коэффициента усиления. В этом режиме транзистор усиливает сигнал, то есть исполняет свою основную функцию.

В активном режиме транзисторы работают в аналоговых схемах, например в усилителях. Этот режим соответствует максимальному значению коэффициента передачи тока эмиттера и обеспечивает минимальное искажение усиливаемого сигнала.

### ***Инверсный активный режим***

В инверсном режиме к коллекторному переходу приложено прямое напряжение, к эмиттерному – обратное (для транзистора  $n-p-n$  типа). В результате коллекторный переход открыт, а эмиттерный – закрыт. Эмиттер и коллектор меняются местами, но т.к. их площади различны, то коэффициент усиления в этом режиме меньше, чем в активном режиме. Инверсный режим используется в схемах очень редко.

### ***Режим отсечки***

В этом режиме коллекторный  $p-n$  переход смещён в обратном направлении, а на эмиттерный переход может быть подано как обратное, так и прямое смещение, не превышающее порогового значения, (для кремниевых транзисторов приблизительно  $0,6 \dots 0,7$  В). Ток базы не возникает и оба перехода транзистора закрыты, следовательно, ток через транзистор не протекает. Таким образом, транзистор переходит в состояние отсечки и сигнал не усиливает. Этот режим используется в цифровых схемах, когда транзистор работает как ключ в положении «разомкнуто».

### ***Режим насыщения***

В этот режим биполярный транзистор входит при увеличении тока базы до некоего предельного значения, при котором р-п-переходы полностью открываются. Значение тока, протекающего через коллектор при его насыщении, зависит лишь от питающего напряжения и величины нагрузки в коллекторной цепи. В данном режиме входной сигнал не усиливается, ведь коллекторный ток не воспринимает изменений тока базы. Способность транзистора к переходу в насыщение используется в цифровой технике, когда транзистор играет роль ключа в замкнутом положении.

В режиме насыщения оба перехода находятся под прямым смещением. В этом случае выходной ток не зависит от входного и определяется только параметрами нагрузки.

Режимы насыщения и отсечки используется одновременно в ключевых схемах (при работе транзистора в ключевом режиме).

### ***Барьерный режим***

В данном режиме база транзистора по постоянному току соединена накоротко или через небольшой резистор с его коллектором, а в коллекторную или в эмиттерную цепь транзистора включается резистор, задающий ток через транзистор. В таком включении транзистор представляет собой своеобразный диод, включённый последовательно с токозадающим резистором.

Использование транзистора в барьерном режиме позволяет схеме работать практически на любой частоте, в большом диапазоне температур. Этот режим нетребователен к параметрам транзисторов

### ***Основные параметры биполярных транзисторов:***

Основными параметрами, характеризующими транзистор, являются коэффициенты усиления по току  $K_i = \frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}}$ , по напряжению

$K_u = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}$ , по мощности  $K_p = \frac{K_i}{K_u} = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}}$ , а также входное сопротивление

$R_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вх}}}{I_{\text{вх}}}$  и выходное сопротивление  $R_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{вых}}}{I_{\text{вых}}}$ . Указанные

параметры транзисторов рассчитываются для разных схем их включения [1].

Наиболее полно свойства биполярного транзистора описываются с помощью статических вольтамперных характеристик. Основные вольтамперные характеристики отображают зависимость между электрическим током и напряжением транзистора в конкретной схеме включения, которые могут быть следующих типов:

1. Входные характеристики: они описывают изменения в токе на входе с изменением значений напряжения на входе, удерживающим напряжением на выходе постоянным.

2. Выходные характеристики: отображают изменения тока и напряжения на выходе при неизменном токе на входе.

Используются также и другие характеристики, например, характеристики передачи тока ( $K_i$ ): это кривая характеристик, показывающая изменение тока на выходе в соответствии с током на входе, при этом напряжение на выходе постоянное.

Каждой схеме включения транзистора соответствуют свои вольтамперные характеристики, представляющие собой функциональную зависимость токов через транзистор от приложенных напряжений. Из-за нелинейного характера указанных зависимостей их представляют обычно в графической форме.

### ***Схемы включения биполярных транзисторов***

Различают **три схемы включения** транзистора: с общим эмиттером (ОЭ), с общей базой (ОБ) и общим коллектором (ОК). Общим называют электрод, который связан как с входной, так и выходной цепями и относительно которого измеряют и задают напряжения. Для обозначения напряжений, подаваемых на электроды транзистора, используются двойные индексы. Первый индекс идентифицирует электрод, на который подается напряжение, измеряемое относительно общего электрода, обозначаемого вторым индексом.

В этих схемах источники постоянного напряжения и резисторы обеспечивают режимы работы транзисторов по постоянному току, то есть необходимые значения напряжений и начальных токов. Входные сигналы переменного тока создаются источниками  $U_{вх}$ . Они изменяют ток эмиттера (базы) транзистора, а, соответственно, и ток коллектора. Приращения тока коллектора и тока эмиттера создадут на рези-

сторы  $R_H$  (сопротивление нагрузки) приращение напряжения, которое и является выходным сигналом  $U_{вых}$ .

Стоит отметить, что не имеет принципиальной разницы, какой тип прибора используется – полевой или биполярный.

#### Схема включения с общей базой

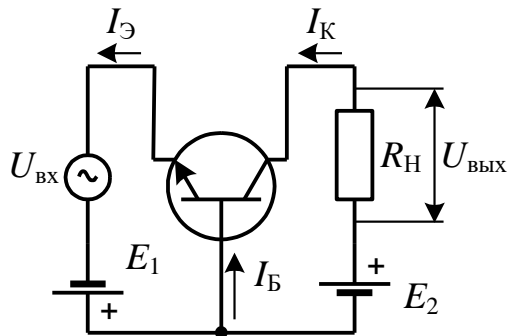


Рис. 2.31. Схема включения с общей базой

При включении транзистора по схеме с общей базой (рис. 2.31) коэффициент усиления по току  $\alpha$ , всегда немного меньше единицы. Коэффициент усиления по напряжению здесь такой же, как и в схеме с общим эмиттером. В этой схеме полностью исключено влияние эффекта Миллера. Это делает схему с общей базой предпочтительной для работы

в широком частотном диапазоне сигнала, что позволяет использовать ее в устройствах СВЧ. Входное сопротивление усилительного каскада с общей базой мало зависит от тока эмиттера, и не превышает единиц – сотен Ом, так как входная цепь каскада при этом представляет собой открытый эмиттерный переход транзистора. Выходное сопротивление также не очень большое, поэтому схемы с ОБ применяют в антенных усилителях, где волновое сопротивление кабелей обычно не превышает 100 Ом. Кроме того схема с ОБ не инвертирует фазу сигнала.

К недостаткам схемы с общей базой можно также отнести необходимость использования двух источников питания.

*Основные параметры для схемы с общей базой.*

$$K_{iБ} = \frac{I_K}{I_Э} = \alpha;$$

$$R_{вхБ} = \frac{U_{ЭБ}}{I_Э},$$

где  $\alpha < 1$  – коэффициент передачи тока эмиттера;  $R_{вхБ}$  сопротивление открытого эмиттерного перехода, составляющее десятки Ом.

$$K_{uБ} = \frac{U_H}{U_{ЭБ}} = \frac{I_K R_H}{I_Э R_{вхБ}} = \alpha \frac{R_H}{R_{вхБ}}, \quad K_{uБ} \gg 1.$$

Таким образом, схема с общей базой характеризуется малым входным сопротивлением, отсутствием усиления по току, большим усилением по напряжению и мощности.

На рис. 2.32. показаны входные (а) и выходные (б) характеристики биполярного транзистора  $n-p-n$  типа для схемы включения с ОБ. Эти характеристики имеют нелинейный характер. Входные характеристики подобны прямой ветви ВАХ диода, а выходные характеризуются вначале резким возрастанием выходного тока  $I_K$ , а затем, по мере дальнейшего роста напряжения, незначительным его увеличением. Переход значений выходного тока на пологий участок соответствует границе области режима насыщения транзистора, когда оба перехода открыты.

На выходных характеристиках видны области двух режимов его работы: нормальный (активный) режим работы при напряжении  $U_{БК} > 0$  (I квадрант) и режим насыщения (II квадрант).

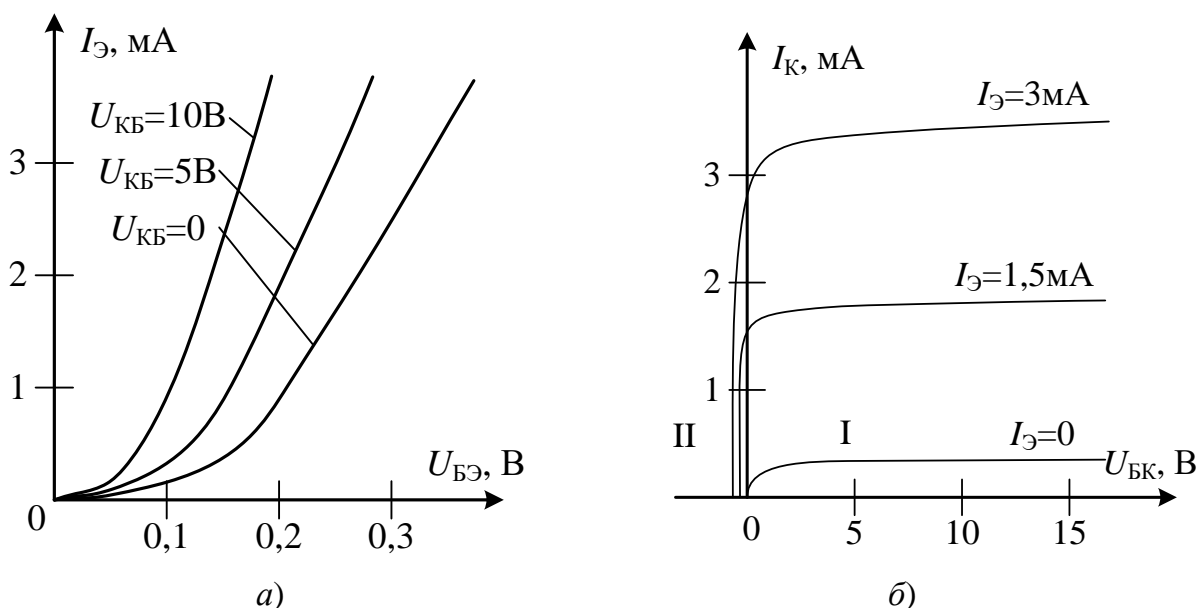


Рис. 2.32. Входные (а) и выходные (б) характеристики транзистора с ОБ

### Схема включения с общим эмиттером

Эта схема (рис. 2.33) дает наибольшее усиление входного сигнала по напряжению и току (а отсюда и по мощности – до десятков тысяч единиц), в связи с чем является наиболее распространенной. Здесь переход эмиттер-база включается прямо, а переход база-коллектор – обратно. А поскольку и на базу, и на коллектор подается напряжение

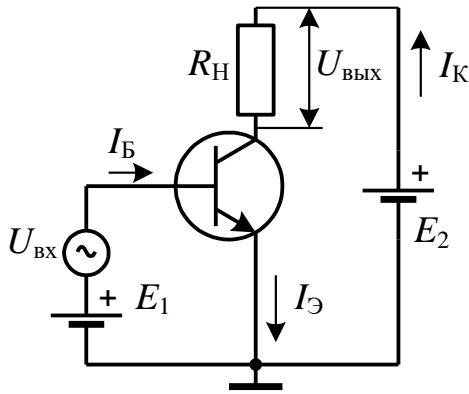


Рис. 2.33. Схема включения с общим эмиттером

одного знака, то схему можно запитать от одного источника. В этой схеме фаза выходного переменного напряжения меняется относительно фазы входного переменного напряжения на 180 градусов, т.е. выходное переменное напряжение инвертируется относительно входного.

Схема с ОЭ имеет и существенный недостаток. Эта схема имеет меньшую температурную стабильность. Частотные свойства такого

включения по сравнению со схемой с общей базой существенно хуже, что обусловлено эффектом *Миллера*, заключающегося в увеличении емкости перехода коллектор-база. Это приводит к значительному ухудшению усилительных свойств транзистора. Таким образом, если транзистор должен работать на высоких частотах, то лучше использовать другую схему включения, например, с общей базой.

*Основные параметры* для схемы с общим эмиттером.

$$K_{iЭ} = \frac{I_K}{I_B} = \beta,$$

где  $\beta$  – коэффициент передачи тока базы

$$R_{вхЭ} = \frac{U_{ЭБ}}{I_B} = \frac{U_{ЭБ} I_{Э}}{I_B I_{Э}} = R_{вхБ} \frac{I_K + I_B}{I_B} = R_{вхБ} (\beta + 1);$$

$$K_{uЭ} = \frac{U_H}{U_{ЭБ}} = \frac{I_K R_H}{I_B R_{вхЭ}} \approx \frac{R_H}{R_{вхБ}},$$

где  $K_{uЭ} \gg 1$ , так как  $R_H \gg R_{вхБ}$ .

Таким образом, схема с общим эмиттером имеет большее, чем схема с ОБ, входное сопротивление и усиливает сигнал по току, по напряжению и мощности.

На рис. 2.34. показаны входные (а) и выходные (б) характеристики биполярного транзистора  $n-p-n$  типа для схемы включения с ОЭ. Изменение значения входного тока начинается не от нулевого значения входного напряжения, как в случае схемы с ОБ, а при некотором его положительном значении из-за падения напряжения на эмиттерном переходе.

Выходные характеристики полностью располагаются в I квадранте. Здесь можно выделить три области, отвечающие различным режимам работы транзистора: область насыщения (1), область отсечки (2), соответствующая закрытому состоянию транзистора, и активная область (3), соответствующая активному состоянию транзистора, т.е. нормальный режим работы.

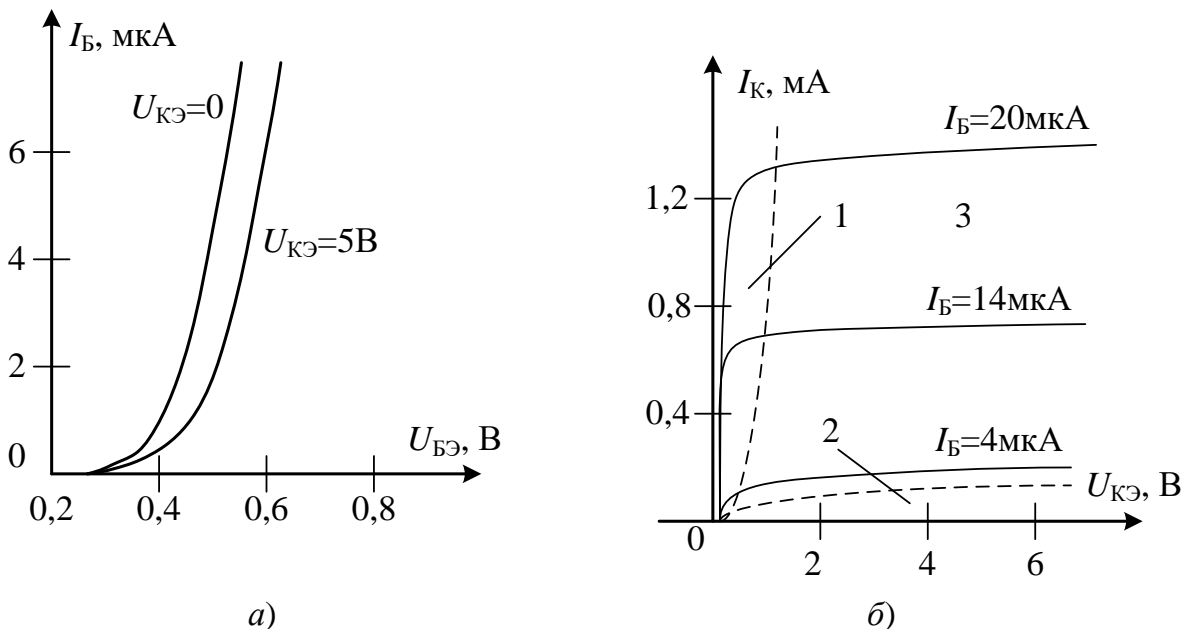


Рис. 2.34. Входные (а) и выходные (б) характеристики транзистора с ОЭ

### *Схема включения с общим коллектором*

Схема с общим коллектором (рис. 2.35) по-другому называется эмиттерным повторителем. Это связано с тем, что разность потенциалов на коллекторе и эмиттере оказываются практически равными и выходное напряжение снимается с эмиттера относительно общего провода. Выходное напряжение по фазе и амплитуде совпадает со входным, т. е. повторяет его. Коэффициент усиления по току почти такой же, как и в схеме с общим эмиттером. А вот коэффициент уси-

ления по напряжению немного меньше единицы (основной недостаток этой схемы). Он приближается к единице, но всегда меньше ее. Таким образом, коэффициент усиления по мощности получается

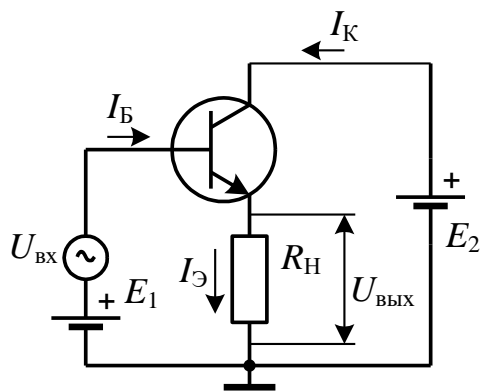


Рис. 2.35. Схема включения с общим коллектором

равным всего нескольким десяткам единиц. В схеме с общим коллектором фазовый сдвиг между входным и выходным напряжением отсутствует. Частотные характеристики и мощность усиления по току и напряжению находятся где-то посередине между схемами с общим эмиттером и с общей ба-

зой. Поскольку схема имеет высокое входное и малое выходное сопротивление, эмиттерные повторители используются в согласующих и буферных усилителях.

*Основные параметры* для схемы с общим коллектором.

$$K_{iК} = \frac{I_{\text{Э}}}{I_{\text{Б}}} = \beta + 1,$$

$$R_{\text{вхК}} = \frac{U_{\text{КБ}}}{I_{\text{Б}}} = \frac{U_{\text{ЭБ}} + U_{\text{Н}}}{I_{\text{Б}}} = R_{\text{вхБ}}(\beta + 1) + R_{\text{Н}}(\beta + 1) = (R_{\text{вхБ}} + R_{\text{Н}})(\beta + 1);$$

$$K_{uК} = \frac{U_{\text{Н}}}{U_{\text{КБ}}} = \frac{I_{\text{Э}} R_{\text{Н}}}{I_{\text{Э}} R_{\text{вхБ}} + I_{\text{Э}} R_{\text{Н}}} = \frac{R_{\text{Н}}}{R_{\text{вхБ}} + R_{\text{Н}}},$$

где  $K_{uК} \approx 1$

Таким образом, схема с общим коллектором имеет значительно большее входное сопротивление, чем любая другая схема, и усиливает сигнал по току и мощности.

Входные характеристики по форме мало отличаются от входных характеристик схемы с ОЭ, но диапазон изменения входного напряжения здесь практически такой же, как диапазон изменения выходного напряжения.

Выходное напряжение здесь отличается от выходного напряжения транзистора с ОЭ на относительно малую величину  $U_{\text{ЭБ}}$ , то и выходные ВАХ мало отличаются от ВАХ транзистора с ОЭ. Однако для того же входного тока выходной ток несколько выше. Для анализа



схем с ОК достаточно иметь ВАХ или параметры транзисторов с ОБ или ОЭ.

Большое входное и малое выходное сопротивления облегчают согласование с выходом предыдущего каскада и с низкоомной нагрузкой. Это обуславливает применение эмиттерного повторителя в качестве согласующего каскада.

### *Составные транзисторы*

Составной транзистор (пара Дарлингтона) представляет собой соединение двух транзисторов, показанное на рис. 2.36.

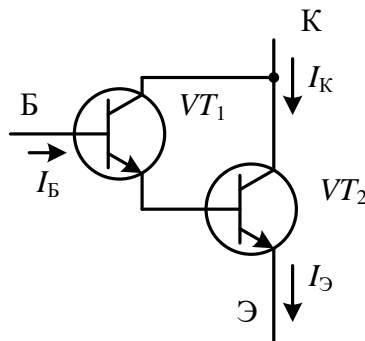


Рис. 2.36. Составной транзистор

Из рисунка видно, что ток базы второго транзистора равен току эмиттера первого:  $I_{B2} = I_{Э1} = (\beta_1 + 1)I_B$ , где  $\beta_1$  – коэффициент передачи по току первого транзистора. Суммарный ток коллектора двух транзисторов равен:  $I_K = \beta_1 I_B + \beta_2 I_{Э1}$

Общий коэффициент передачи по току определяется выражением  $\beta = \frac{I_K}{I_B} \approx \beta_1 \beta_2$

Отсюда видно, что составной транзистор можно рассматривать как один транзистор с большим коэффициентом усиления по току, который реально достигает нескольких тысяч.

### **2.2.2. Полевые транзисторы**

Полевыми транзисторами называют активные полупроводниковые приборы, в которых выходным током управляют с помощью электрического поля. Это главное отличие от биполярных транзисторов, которые управляются током. Управление выходным током в полевых транзисторах происходит посредством изменения приложенного электрического поля, т.е. напряжения.

Таким образом, в основе управления током полевых транзисторов лежит изменение сопротивления канала, через который протекает этот ток под действием электрического поля.

Полевые транзисторы имеют очень большое входное сопротивление (1...10 МОм и более), т.е. входной ток у них практически отсутствует.

Другое название полевых транзисторов – униполярные. «УНО» - значит один. В полевых транзисторах в зависимости от типа канала ток осуществляется только одним типом носителей дырками или электронами. В биполярных транзисторах ток формировался из двух типов носителей зарядов – электронов и дырок.

Часто используются названия полевой транзистор МОП, MOSFET, MOS, МДП-транзистор, транзистор с изолированным затвором, которые относятся к одному и тому же полевому МОП-транзистору.

Полное название такого транзистора на английском языке звучит как **Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistors (MOSFET)**, что в переводе означает полевой транзистор со структурой **Металл Оксид Полупроводник** или просто МОП-транзистор. Название МДП-транзистор означает **Металл-Диэлектрик-Полупроводник**.

Полевые транзисторы имеют три вывода.

1. Исток (источник носителей заряда, аналог эмиттера на биполярном).
2. Сток (приемник носителей заряда от истока, аналог коллектора биполярного транзистора).
3. Затвор (управляющий электрод, аналог базы на биполярных транзисторах).

Сток, исток и соединяющий их канал – это области полупроводника одного типа проводимости. Сток и исток обычно являются сильнолегированными областями, канал – слаболегированным тонким слоем, расположенным вблизи поверхности полупроводника. Проводящий канал может иметь электропроводность как *n*-, так и *p*-типа.

Выделяют два основных типа полевых транзисторов:

- полевые транзисторы с управляющим переходом (в качестве перехода может быть *p-n* переход, гетеропереход или переход Шоттки);
- полевые транзисторы с изолированным затвором (со встроенным или индуцированным каналом). У них затвор выполнен в виде

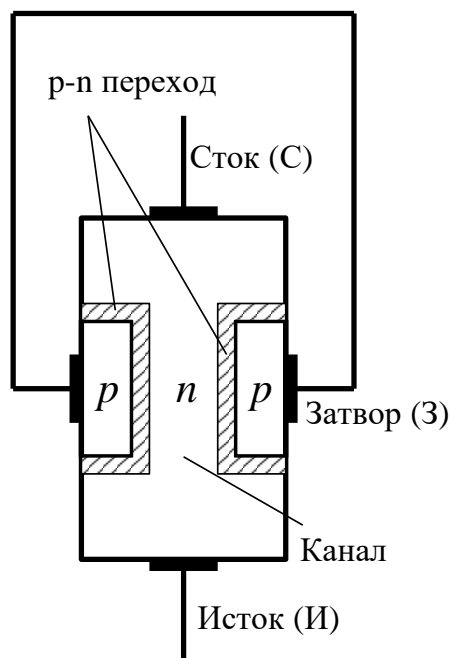
металлической пленки, изолирован от канала тонким слоем диэлектрика ( $\text{SiO}_2$ ), поэтому их называют МДП–транзисторами.

И те и другие могут быть  $n$ -канальными и  $p$ -канальными, к затвору первых нужно прикладывать положительное управляющее напряжение для открытия ключа, а для вторых – отрицательное относительно истока.

Общий принцип работы всех полевых транзисторов сводится к тому, что изменение напряжения между затвором и истоком приводит к изменению сопротивления канала. В результате ток в цепи стока управляется не входным током (как в биполярных транзисторах), а входным напряжением (электрическим полем).

### ***Полевой транзистор с управляющим $p$ - $n$ -переходом (JFET)***

Полевой транзистор с управляющим  $p$ - $n$ - переходом – это полевой транзистор, затвор которого отделен в электрическом отношении от канала  $p$ - $n$ -переходом, смещенным в обратном направлении. Электропроводность канала может быть  $n$ - или  $p$ -типа. В качестве примера на рис. 2.37 показано устройство транзистора, с каналом из полупроводника  $n$ -типа. Условное обозначение полевых транзисторов показано на рис. 2.38



2.37. Полевой транзистор с управляющим  $p$ - $n$  переходом

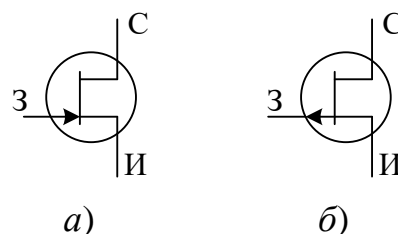


Рис. 2.38. Условное обозначение полевого транзистора с управляющим  $p$ - $n$  переходом:  
а) с каналом  $n$ -типа;  
б) с каналом  $p$ -типа

Основу транзистора составляет пластина из полупроводника с проводимостью  $n$ - или  $p$ -типа, которая образует канал для прохождения основного тока. На противоположных концах пластина имеет электроды, подав напряжение на которые мы получим ток от истока к стоку. Схема подключения полевого транзистора показана на рис. 2.39. Между затвором и  $n$ -областью возникает  $p$ - $n$  переход. А поскольку  $p$ -слой значительно уже канала, то большая часть обедненной подвижными носителями заряда области перехода будет приходиться на  $n$ -слой.

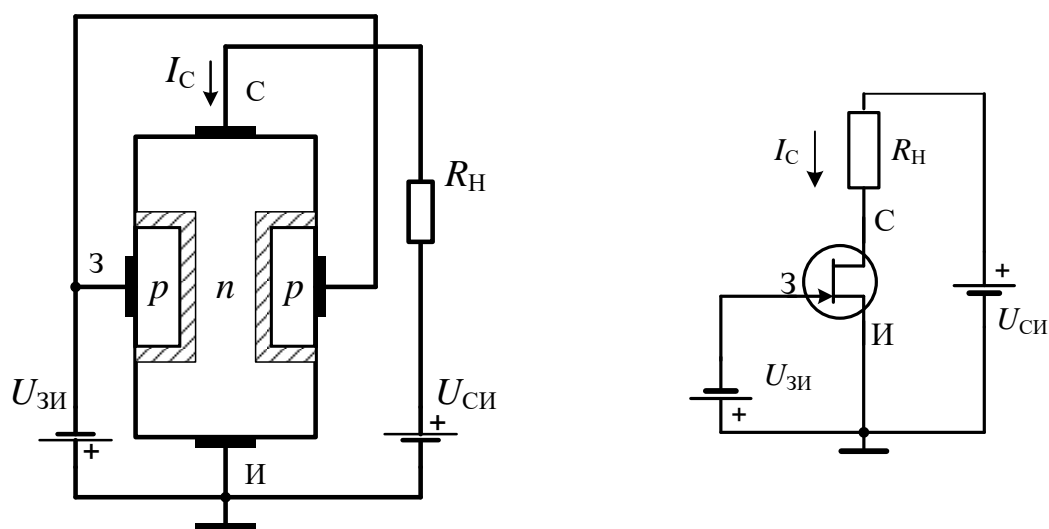


Рис. 2.39. Схема подключения полевого транзистора

Если к такому транзистору приложить напряжение, к стоку плюс, а к истоку минус, через него потечет ток  $I_C$  большой величины, он будет ограничен только сопротивлением канала, внешними сопротивлениями  $R_H$  и внутренним сопротивлением источника питания. Можно провести аналогию с нормально-замкнутым ключом. Этот ток называется  $I_{C_{нач}}$  или начальный ток стока при  $U_{зи} = 0$ . Полевой транзистор с управляющим  $p$ - $n$ -переходом, без приложенного управляющего напряжения к затвору является максимально открытым.

Это значит, что если транзистор  $n$ -канальный к истоку подключают отрицательный вывод источника питания, т.к. в нем основными носителями заряда являются электроны (отрицательные носители зарядов). если транзистор  $p$ -канальный, то к истоку

подключают положительный вывод источника питания, т.к. основными носителями являются дырки (положительные носители зарядов) – это так называемая дырочная проводимость.

Исток – источник основных носителей заряда.

При подаче отрицательного напряжения на затвор относительно истока ( $U_{ЗИ}$ ) для  $n$ -канального и положительного для  $p$ -канального, он смещается в обратном направлении, область  $p$ - $n$  перехода расширяется в сторону канала (рис. 2.40). В результате чего ширина канала уменьшается, ток снижается. Ключ начинает закрываться. При некотором напряжении затвора ключ полностью закрывается и ток через ключ перестает протекать. Это напряжение называется напряжением отсечки.

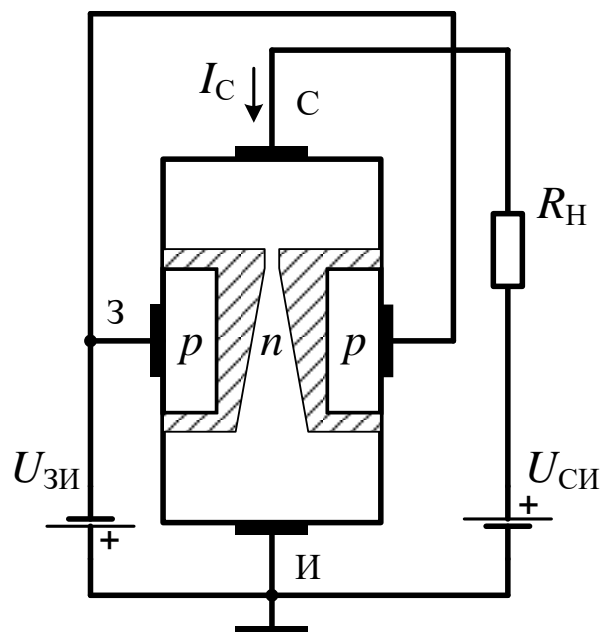


Рис. 2.40. Расширение области  $p$ - $n$  перехода

Рабочий режим транзистора при напряжении  $U_{ЗИ}$  либо нулевое, либо обратное. За счет обратного напряжения можно «прикрывать транзистор», используется в усилителях класса А и прочих схемах где нужно плавное регулирование.

Режим отсечки наступает, когда  $U_{ЗИ} = U_{отсечки}$ . Для каждого транзистора оно своё, но в любом случае прикладывается в обратном направлении.

### Статические характеристики полевого транзистора с управляющим *p-n*-переходом

Поскольку в рабочем режиме ток затвора обычно невелик или вообще равен нулю, то графики входных характеристик полевых транзисторов мы рассматривать не будем. Перейдем сразу к выходным или стоковым.

На рисунке 2.41 изображена стоко-затворная характеристика транзистора с *n*-каналом, т.е. зависимость тока стока от напряжения на затворе при постоянном напряжении между истоком и стоком  $I_C = f(U_{ЗИ})|_{U_{СИ}=\text{const}}$ . Для транзистора с каналом *p*-типа характеристика симметрична *n*-канальной относительно начала координат.

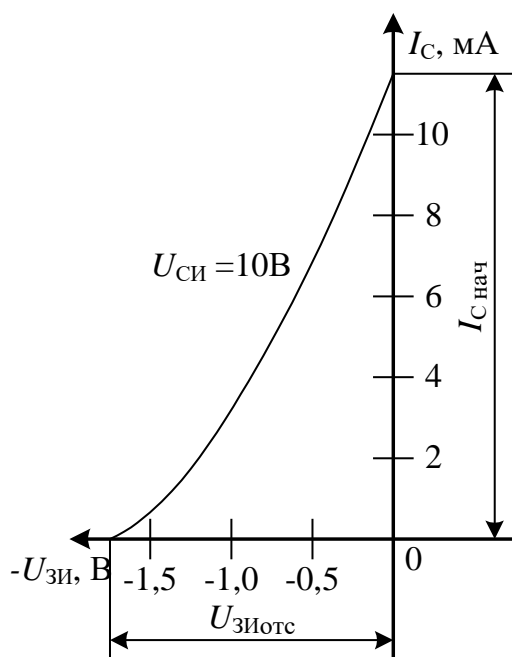


Рис. 2.41. Стоко-затворная характеристика

вычислить исходя из стоко-затворной характеристики, на приведенном выше примере крутизна равняется порядка 8 мА/В. Крутизна характеристики является одним из основных параметров полевого транзистора.

Эту характеристику также называют управляющей. Чем ближе напряжение  $U_{ЗИ}$  к 0, тем больший ток стока.

Выходной характеристикой (рис. 2.42) называют график, на котором изображена зависимость тока стока  $I_C$  от напряжения  $U_{СИ}$ ,

В биполярных транзисторах был такой параметр как коэффициент передачи тока или коэффициент усиления, он обозначался как  $\beta$  или  $h_{21э}$ . В полевых транзисторах для отображения способности усиливать напряжение используется крутизна  $S = \frac{dI_C}{dU_{ЗИ}}$ .

То есть крутизна показывает, насколько миллиампер (или ампер) растёт ток стока при увеличении напряжения затвор-исток на количество вольт при неизменяемом напряжении сток-исток. Её можно

приложенного к выводам стока и истока, при различных напряжениях затвора  $I_C = f(U_{СИ})|_{U_{ЗИ=const}}$ .

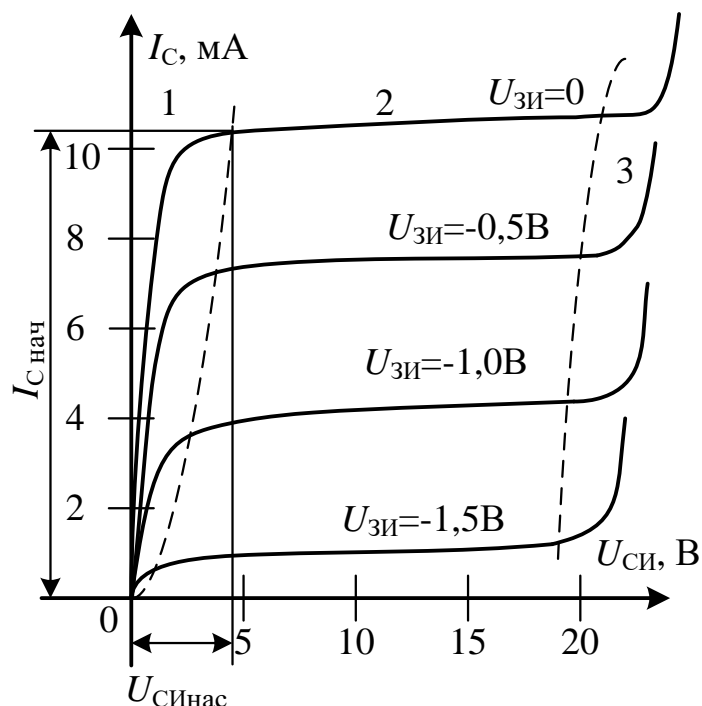


Рис. 2.42. Выходная характеристика транзистора с каналом *n*-типа

На графике можно выделить три зоны. Первая из них (1) — зона резкого возрастания тока стока. Это так называемая «омическая» область. Канал «исток-сток» ведет себя как резистор, чье сопротивление управляется напряжением на затворе транзистора.

Вторая зона (2) — область насыщения. Она имеет почти линейный вид. Здесь происходит перекрытие канала в области стока, которое увеличивается при дальнейшем росте напряжения исток-сток. Соответственно, растет и сопротивление канала, а стоковый ток меняется очень слабо. Именно этот участок характеристики используют в усилительной технике, поскольку здесь наименьшие нелинейные искажения сигналов и оптимальные значения малосигнальных параметров, существенных для усиления. К таким параметрам относятся крутизна характеристики, внутреннее сопротивление и коэффициент усиления.

Третья зона (3) графика — область пробоя. При дальнейшем увеличении напряжения  $U_{СИ}$  ток резко возрастает, что может привести к выходу из строя транзистора в результате пробоя.

### Схемы включения

Как и у биполярных транзисторов есть три типовых схемы включения (рис. 2.43):

1. С общим истоком (а). Используется чаще всех, даёт усиление по току и мощности.

2. С общим затвором (б). Редко используется, низкое входное сопротивление, усиления нет.

3. С общим стоком (в). Усиление по напряжению близко к 1, большое входное сопротивление, а выходное низкое. Другое название – истоковый повторитель.

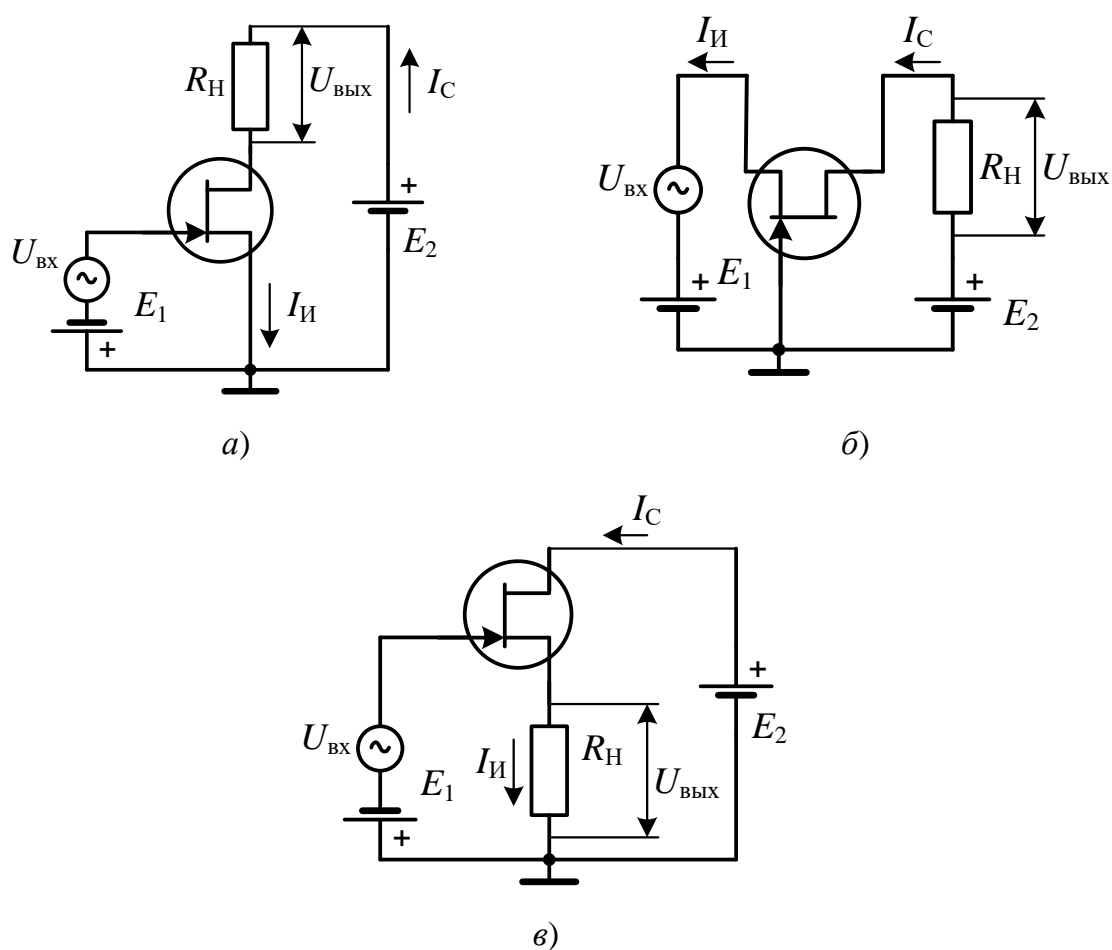


Рис. 2.43. Схемы включения полевых транзисторов

### Полевые транзисторы с изолированным затвором (MOSFET)

Название *MOSFET* происходит от английских слов *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistors*. Этот вид транзисторов активно используется в качестве полупроводниковых управляемых ключей.



Причем работают они чаще всего именно в ключевом режиме (два положения «вкл» и «выкл»).

В отличие от полевых транзисторов с управляющим  $p-n$ - переходом, у которых затвор имеет электрический контакт с каналом, в полевых транзисторах с *изолированным затвором* затвор представляет собой тонкую пленку металла, изолированного от полупроводника. В зависимости от вида изоляции различают МДП и МОП транзисторы (соответственно, металл – диэлектрик – полупроводник и металл – оксид – полупроводник, например двуокись кремния  $SiO_2$ ).

Транзисторы с изолированным затвором бывают двух типов – со встроенным каналом и с индуцированным каналом

#### *Транзисторы со встроенным каналом*

На рис. 2.44 изображена структура транзистора с встроенным каналом. Устройство транзисторов такого вида следующее. Есть подложка из полупроводника с  $p$ -проводимостью, в которой сделаны две области с повышенным содержанием примесных носителей заряда ( $n^+$ ) с повышенной проводимостью. Этот материал сильно легирован, то есть концентрация электронов в этом полупроводнике очень большая. Этим области являются истоком и стоком. Между ними пролегает узкая приповерхностная перемычка, проводимость которой также  $n$ -типа. Над ней на поверхности пластины имеется тонкий слой диэлектрика (чаще всего из диоксида кремния — отсюда, кстати, аббревиатура МОП). А уже на этом слое и расположен затвор — тонкая металлическая пленка. Сам кристалл обычно соединен с истоком, хотя бывает, что его подключают и отдельно.

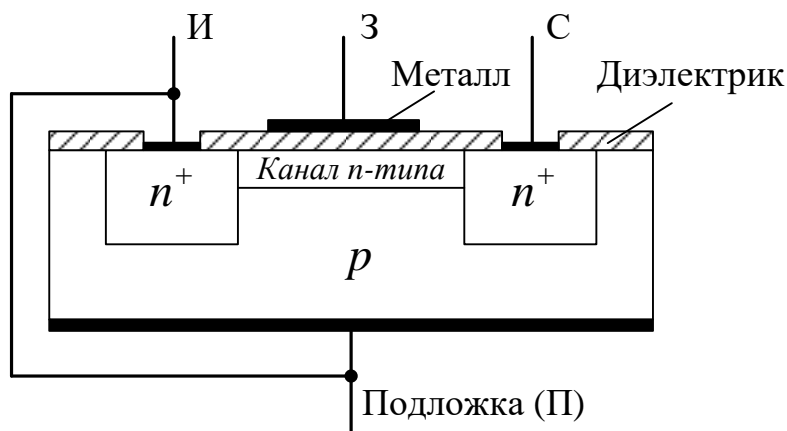


Рис. 2.44. Структура транзистора с встроенным каналом  $n$ -типа.

В данном случае на рисунке видно, что подложка соединена с истоком, что изображается на многих условных графических обозначениях.

Если при нулевом напряжении на затворе подать напряжение исток-сток, то по каналу между ними потечет ток.

А теперь подадим на затвор отрицательное относительно истока напряжение. Возникшее поперечное электрическое поле «вытолкнет» электроны из канала в подложку. Соответственно, возрастет сопротивление канала и уменьшится текущий через него ток. Такой режим, при котором с возрастанием напряжения на затворе выходной ток падает, называют режимом обеднения.

Если же мы подадим на затвор напряжение, которое будет способствовать возникновению «помогающего» электронам поля «приходить» в канал из подложки, то транзистор будет работать в режиме обогащения. При этом сопротивление канала будет падать, а ток через него расти.

Рассмотренная выше конструкция транзистора с изолированным затвором похожа на конструкцию с управляющим  $p-n$  переходом тем, что даже при нулевом токе на затворе при ненулевом напряжении исток-сток между ними существует так называемый начальный ток стока. В обоих случаях это происходит из-за того, что канал для этого тока встроен в конструкцию транзистора.

Условные графические обозначения и схема включения полевого транзистора с встроенным каналом показана на рис. 2.45.

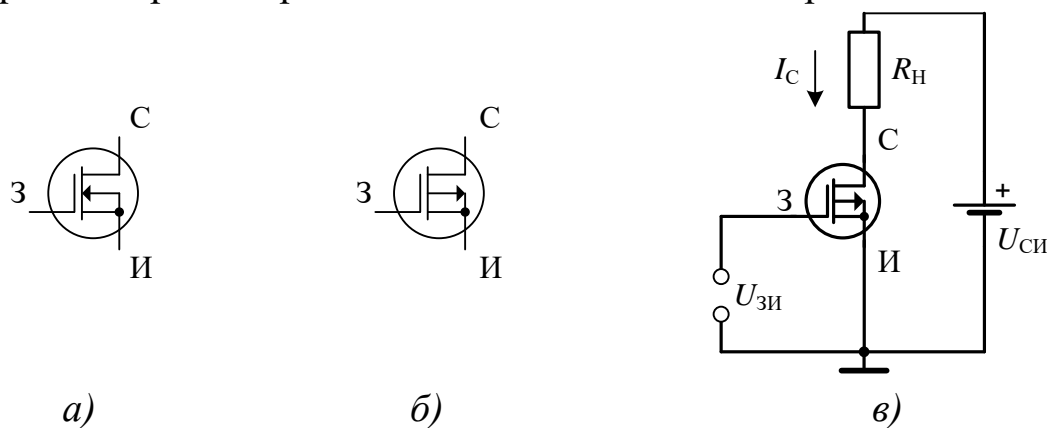


Рис. 2.45. Полевой транзистор с встроенным каналом: *а)* условное обозначение транзистора с каналом  $n$ -типа; *б)* условное обозначение транзистора с каналом  $p$ -типа; *в)* схема включения транзистора

## Статические характеристики транзисторов с встроенным каналом

На рисунке 2.46 изображена стоко-затворная, а на рис.2.47 выходная характеристики транзистора с  $n$ -каналом. Здесь всё практически, также, как и в транзисторе с управляющим переходом, за исключением наличия режима обогащения.

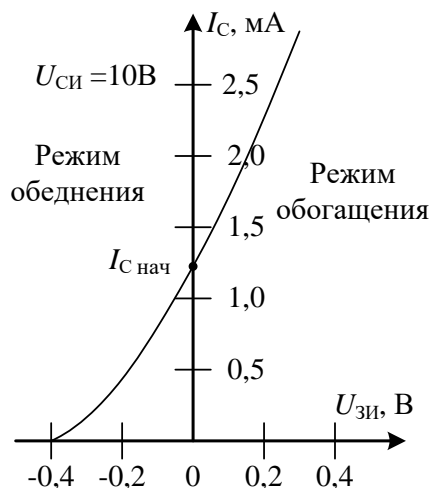


Рис. 2.46. Стоко-затворная характеристика транзистора с каналом  $n$ -типа

На стоко-затворной характеристике четко видно, что отрицательное напряжение вызывает режим обеднения и закрытие ключа, а положительное напряжение на затворе — обогащение и большее открытие ключа.

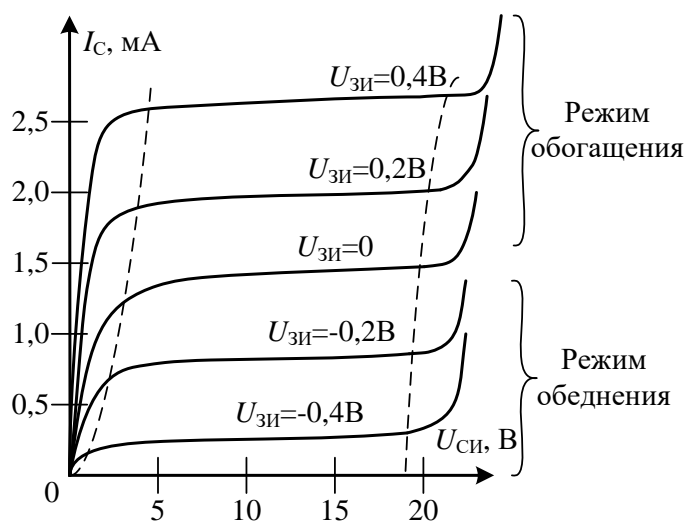


Рис. 2.47. Выходная характеристика транзистора с каналом  $n$ -типа

### Транзисторы с индуцированным каналом

МОП-транзисторы с индуцированным каналом не проводят ток при отсутствии напряжения на затворе, вернее ток есть, но он крайне мал, т.к. это обратный ток между подложкой и высоколегированными участками стока и истока (рис. 2.48). Подадим на затвор (прямое относительно истока) напряжение. Возникшее электрическое поле «потянет» электроны из сильнолегированных областей в подложку в направлении затвора. Концентрация электронов превысит концентрацию дырок, и между стоком и истоком возникнет тонкий канал  $n$ -типа (рис. 2.49). Так появляется «коридор» для электронов от истока к стоку, таким образом, появляется канал, транзистор открывается. Транзистор начнет проводить ток, тем сильнее, чем выше напряжение на затворе. Канал между сильнолегированными областями стока и истока появляется (индуцируется) только при подаче на затвор напряжения определенной полярности. Из такой его конструкции понятно, что работать транзистор с индуцированным каналом может только находясь в режиме обогащения. Полевой транзистор с изолированным затвором и индуцированным каналом аналог нормально-разомкнутого ключа, ток не протекает.

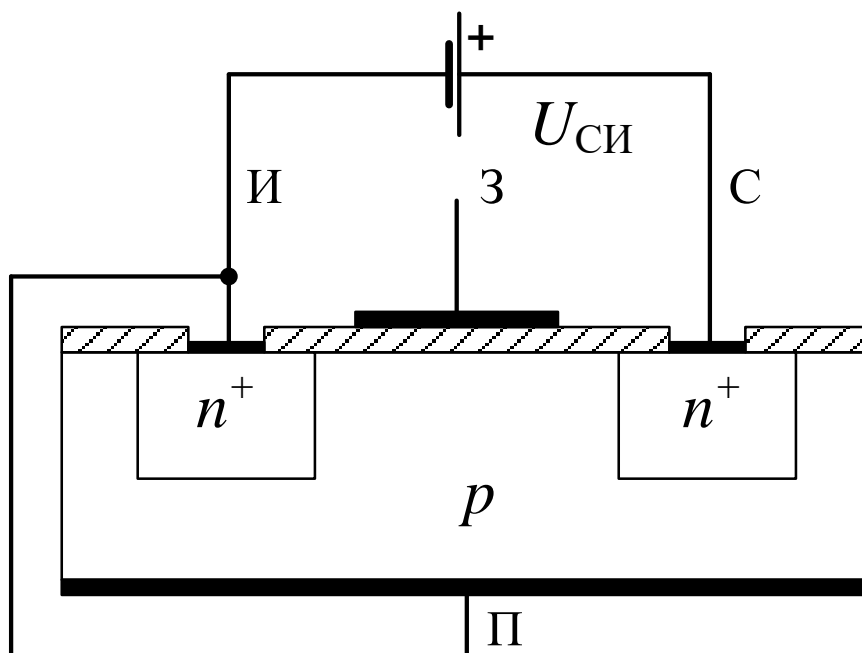


Рис. 2.48. Структура транзистора с индуцированным каналом  $n$ -типа

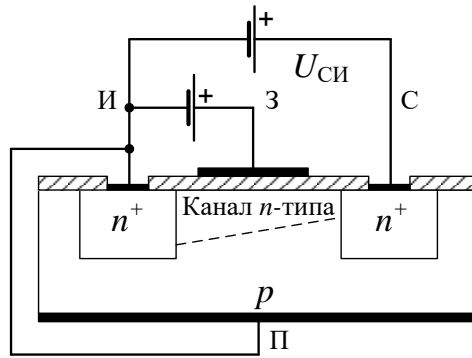


Рис. 2.49. Подача напряжения на затвор транзистора с индуцированным каналом *n*-типа

Условные графические обозначения полевого транзистора с индуцированным каналом показана на рис. 2.50. Стоко-затворная характеристика (рис. 2.51) в точности повторяет характеристику как у предыдущих транзисторов. Разница заключается лишь в том, что напряжения  $U_{ЗИ}$  становятся положительными. Выходная характеристика (рис. 2.52) показывает то же самое, отличия опять-таки в напряжениях на затворе.

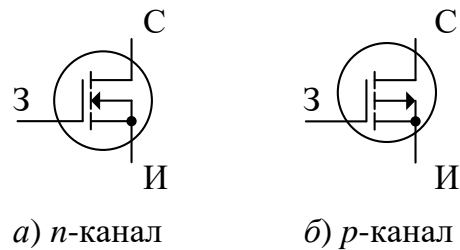


Рис. 2.50. Условные графические обозначения полевого транзистора с индуцированным каналом

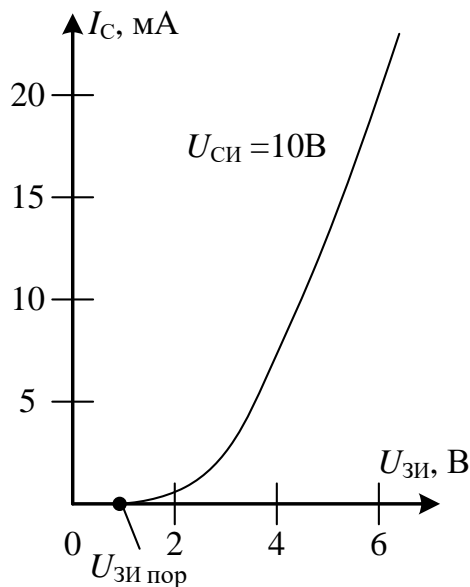


Рис. 2.51. Стоко-затворная характеристика

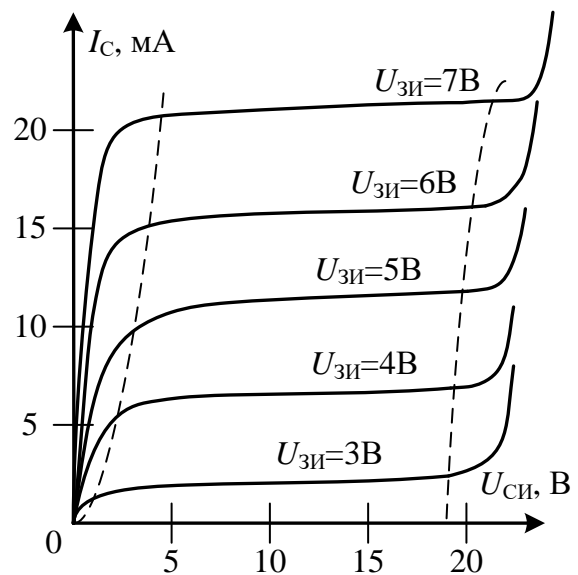


Рис. 2.52. Выходная характеристика

*Достоинства полевых транзисторов.*

1. Высокое входное сопротивление.
2. Малый уровень собственных шумов и помех (нет рекомбинационного шума).
3. Высокая устойчивость к температурным и радиационным воздействиям.
4. Допускается высокая плотность расположения элементов при изготовлении интегральных схем.

*Особенности применения полевых транзисторов.*

1. *n*-канальные транзисторы обладают большей крутизной  $S$ , чем *p*-канальные, и поэтому чаще используются в практических схемах.
2. Наиболее часто на практике применяются МДП-транзисторы с индуцированным каналом.
3. Отсутствие принципиальной разницы по малосигнальным параметрам (свойствам) между МДП-транзисторами и полевыми транзисторами с управляющим *p-n* переходом.
4. Имеется различие между МДП-транзистором со встроенным и индуцированным каналами и полевым транзистором с управляющим *p-n* переходом при задании рабочей точки транзистору.

### **2.2.3. Силовые транзисторы**

#### ***Силовые MOSFET транзисторы***

Технологические возможности и успехи в разработке современных полевых транзисторов привели к созданию мощных полевых транзисторов за приемлемую цену.

В семействе полевых транзисторов есть отдельная группа мощных полупроводниковых приборов называемых HEXFET. Их принцип работы основан на весьма оригинальном техническом решении. Структура транзисторов этого типа представляет собой несколько тысяч МОП ячеек включенных параллельно. Ячеистые структуры образуют шестиугольник. Из-за шестиугольной или по-другому гексагональной структуры данный тип мощных МОП-транзисторов и называют HEXFET. Первые три буквы этой аббревиатуры взяты от английского слова hexagonal – «гексагональный». Под многократным

увеличением кристалл мощного HEXFET транзистора показан на рисунке 2.53. Кристалл имеет шестиугольную структуру.

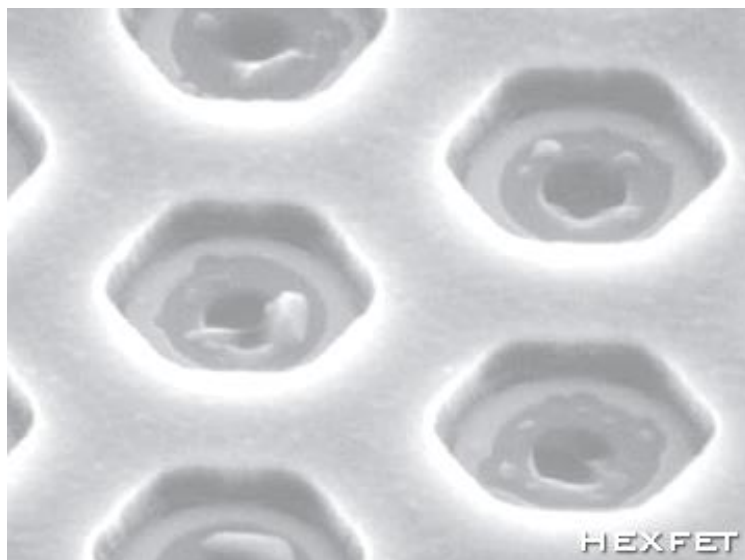


Рис. 2.53. Структура кристалла мощного HEXFET транзистора

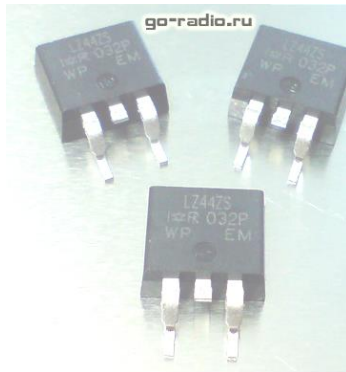
Мощный MOSFET, представляет собой микросхему, в которой объединены тысячи отдельных простейших полевых транзисторов. В совокупности они создают один мощный транзистор, который может пропускать через себя большой ток и при этом практически не оказывать значительного сопротивления.

Благодаря особой структуре и технологии изготовления транзисторов HEXFET, сопротивление канала удалось заметно снизить. Это позволило решить проблему коммутации токов в несколько десятков ампер при напряжении до 1000 вольт.

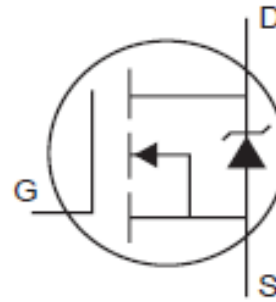
Мощные HEXFET транзисторы применяются в схемах коммутации электропитания, зарядных устройствах, системах управления электродвигателями, усилителях низкой частоты, ключах для управления мощными нагрузками.

Несмотря на то, что транзисторы MOSFET, изготовленные по технологии HEXFET (параллельных каналов) обладают сравнительно небольшим сопротивлением открытого канала, сфера применения их ограничена, и они применяются в основном в высокочастотных силовых схемах. В высоковольтной силовой электронике предпочтение порой отдают схемам на основе IGBT транзистора.

Внешний вид и условное графическое изображение MOSFET транзистора ( $n$ -канальный МОП) показано на рис. 2.54.



а) Транзисторы HEXFET марки IRLZ44ZS



б) условное графическое изображение

Рис. 2.54. MOSFET транзистор

Как и биполярные транзисторы, полевые структуры могут быть прямой проводимости или обратной. То есть с *p*-каналом или *n*-каналом. Выводы обозначаются следующим образом:

*D-drain* (сток);

*S-source* (исток);

*G-gate* (затвор).

*Основные параметры MOSFET транзисторов.*

Вся совокупность параметров MOSFET транзисторов может потребоваться только разработчикам сложной электронной аппаратуры  
Основные параметры:

$V_{DSS}$  (Drain-to-Source Voltage) – напряжение между стоком и истоком. Это, как правило, напряжение питания вашей схемы. При подборе транзистора всегда необходимо помнить о 20% запасе.

$I_D$  (Continuous Drain Current) – ток стока или непрерывный ток стока. Всегда указывается при постоянной величине напряжения затвор-исток (например,  $V_{GS}=10V$ ).

$R_{DS(on)}$  (Static Drain-to-Source On-Resistance) – сопротивление сток-исток открытого канала. При увеличении температуры кристалла транзистора сопротивление открытого канала увеличивается.

$P_D$  (Power Dissipation) – мощность транзистора в ваттах. По-иному этот параметр ещё называют мощностью рассеяния. В технических характеристиках на конкретный транзистор величина данного параметра указывается для определённой температуры кристалла.

$V_{GS}$  (Gate-to-Source Voltage) – напряжение насыщения затвор-исток. Это напряжение, при превышении которого увеличения тока



через канал не происходит. По сути, это максимальное напряжение между затвором и истоком.

$V_{GS(th)}$  (Gate Threshold Voltage) – пороговое напряжение включения транзистора. Это напряжение, при котором происходит открытие проводящего канала транзистора и он начинает пропускать ток между выводами истока и стока. Если между выводами затвора и истока приложить напряжение меньше  $V_{GS(th)}$ , то транзистор будет закрыт.

При температуре 175°C оно составляет около 1 вольт, а при температуре 0°C около 2,4 вольт. Поэтому в описании на транзистор, как правило, указывается минимальное (min) и максимальное (max) пороговое напряжение.

В качестве примера рассмотрим основные параметры мощного полевого транзистора IRLZ44ZS фирмы International Rectifier. Данный транзистор имеет малогабаритный корпус для поверхностного монтажа.

Предельное напряжение сток-исток  $V_{DSS}$ : 55 Вольт.

Максимальный ток стока  $I_D$ : 51 Ампер.

Предельное напряжение затвор-исток  $V_{GS}$ : 16 Вольт.

Сопротивление сток-исток открытого канала  $R_{DS(on)}$ : 13,5 мОм.

Максимальная мощность  $P_D$ : 80 Ватт.

Сопротивление открытого канала этого транзистора составляет 13,5 миллиОм (0,0135 Ом).

При повышении температуры ток уменьшается с 51А (при  $t=25^\circ\text{C}$ ) до 36А (при  $t=100^\circ\text{C}$ ). Транзисторы MOSFET обладают большим быстродействием, но у них есть один недостаток – большая ёмкость затвора, поэтому применение полевых транзисторов в цепях высокой частоты ограничивается. В схемах переключения время заряда паразитной входной ёмкости транзистора влияет на скорость его срабатывания.

Семейство мощных транзисторов MOSFET постоянно развивается. В табл. 4.1 приведены краткие выборочные данные транзисторов MOSFET фирмы Motorola. В них можно проследить влияние номиналов максимального рабочего напряжения  $U$  и тока  $I$  на величину сопротивления в открытом состоянии  $R_{DS}$ . Увеличение рабочего напряжения  $U$  вызывает резкое возрастание сопротивления. Хотя по номиналам токов и напряжения транзисторы MOSFET перекрывают значительную часть диапазона, используемого в сфере электропривода,

их применение должно быть тщательно обосновано для каждого конкретного случая.

Таблица 2.3. Транзисторы MOSFET фирмы Motorola

Тип	$U$ , В	$I$ , А	$R_{DS}$ , Ом (max)
MTP75N06HD	60	75	0.010
MTP75N03HDL	30	75	0.075
MTB15N06V	60	15	0.120
MTD4N20E	200	4	1.20
MTD1N60E	600	1	8
MTD1N80E	800	1	12
MTB4N80E	800	4	3
MTB3N120E	1200	3	5
MTV10N100E	1000	10	1.30
MTV25N50E	500	25	0.200
MTY55N20E	200	55	0.028
MTY100N10E	100	100	0.010

При работе с полевыми транзисторами, особенно с изолированным затвором, нужно помнить, что они боятся статического электричества. Впаивать их в схему можно только предварительно закоротив выводы между собой тонкой проволокой.

При хранении все выводы МОП-транзистора лучше закоротить с помощью обычной алюминиевой фольги. Это уменьшит риск пробоя затвора статическим электричеством. При монтаже на печатную плату МОП-транзистора лучше использовать паяльную станцию, а не обычный электрический паяльник.

### ***Силовые биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT).***

В современной силовой электронике широкое распространение получили биполярные транзисторы с изолированным затвором (БТИЗ), или транзисторы IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistors*). IGBT транзистор представляет собой электронный силовой прибор, который используется в качестве мощного электронного ключа, уста-

навливаемого в импульсные источники питания, инверторы, а также системы управления электроприводами.

Впервые мощные полевые транзисторы появились в 1973 году, а уже в 1979 году была предложена схема составного транзистора, оснащенного управляемым биполярным транзистором при помощи полевого транзистора с изолированным затвором. В ходе тестов было установлено, что при использовании биполярного транзистора в качестве ключа на основном транзисторе насыщение отсутствует, а это значительно снижает задержку в случае выключения ключа.

Коммерческое использование IGBT началось с 80-х годов, и уже претерпела четыре стадии своего развития.

I поколение IGBT (1985 г.): предельные коммутируемые напряжения 1000 В и токи 200 А в модульном и 25 А в дискретном исполнении, прямые падения напряжения в открытом состоянии 3,0-3,5 В, частоты коммутации до 5 кГц (время включения/выключения около 1 мкс).

II поколение (1991 г.): коммутируемые напряжения до 1600 В, токи до 500 А в модульном и 50 А в дискретном исполнении; прямое падение напряжения 2,5-3,0 В, частота коммутации до 20 кГц (время включения/ выключения около 0,5 мкс).

III поколение (1994 г.): коммутируемое напряжение до 3500 В, токи 1200 А в модульном исполнении. Для приборов с напряжением до 1800 В и токов до 600 А прямое падение напряжения составляет 1,5-2,2 В, частоты коммутации до 50 кГц (времена около 200 нс).

IV поколение (1998 г.): коммутируемое напряжение до 4500 В, токи до 1800 А в модульном исполнении; прямое падение напряжения 1,0-1,5 В, частота коммутации до 50 кГц (времена около 200 нс).

IGBT транзистор – это прибор, который представляет собой гибридный полевой и биполярный транзистор. Данное сочетание привело к тому, что этот тип транзистора унаследовал положительные качества, как полевого транзистора, так и биполярного.

Суть работы IGBT транзистора заключается в том, что полевой транзистор управляет мощным биполярным транзистором. В результате переключение мощной нагрузки становится возможным при малой управляющей мощности, так как управляющий сигнал поступает на затвор полевого транзистора.

Внутренняя структура IGBT – это каскадное подключение двух электронных входных ключей, которые управляют окончательным плюсом. На рисунке 2.55 показана упрощённая эквивалентная схема биполярного транзистора с изолированным затвором.

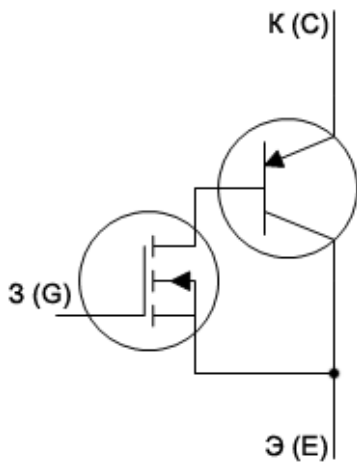


Рис. 2.55. Упрощённая эквивалентная схема БТИЗ (IGBT)

Весь процесс работы БТИЗ может быть представлен двумя этапами: как только подаётся положительное напряжение, между затвором и истоком открывается полевой транзистор, то есть образуется  $n$ -канал между истоком и стоком. При этом начинает происходить движение зарядов из области  $n$  в область  $p$ , что влечет за собой открытие биполярного транзистора, в результате чего от эмиттера к коллектору устремляется ток.

Поскольку IGBT транзистор имеет комбинированную структуру из полевого и биполярного транзистора, то и его выводы получили названия затвор – З (управляющий электрод), эмиттер (Э) и коллектор (К). На зарубежный манер вывод затвора обозначается буквой G, вывод эмиттера – E, а вывод коллектора – C. На рисунке 2.56 показано условное графическое обозначение биполярного транзистора с изолированным затвором.

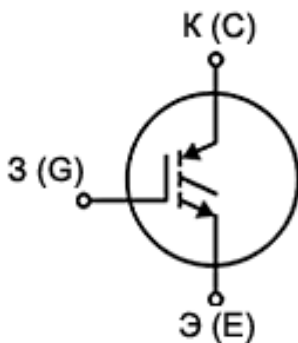


Рис. 2.56. Условное графическое обозначение БТИЗ (IGBT)

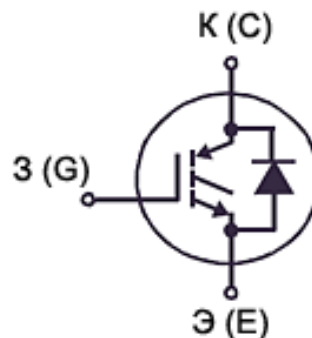


Рис. 2.57. Обозначение БТИЗ (IGBT) со встроенным диодом

### *Особенности и сферы применения БТИЗ.*

Отличительные качества транзисторов IGBT:

- управляется напряжением (как любой полевой транзистор);
- имеют низкие потери в открытом состоянии;
- могут работать при температуре более 100°C;
- способны работать с напряжением более 1000 Вольт и мощностями свыше 5 киловатт.
- по быстродействию IGBT уступают MOSFET, но значительно превосходят биполярные.

Перечисленные качества позволили применять IGBT транзисторы в инверторах, частотно-регулируемых приводах и в импульсных регуляторах тока. Кроме того, они часто применяются в источниках сварочного тока, в системах управления мощными электроприводами, которые устанавливаются, например, на электротранспорт: электровозы, трамваи, троллейбусы. Такое решение значительно увеличивает КПД и обеспечивает высокую плавность хода.

Кроме того, устанавливают данные устройства в источниках бесперебойного питания и в сетях с высоким напряжением. IGBT транзисторы можно обнаружить в составе электронных схем стиральных, швейных и посудомоечных машин, инверторных кондиционеров, насосов, системах электронного зажигания автомобилей, системах электропитания серверного и телекоммуникационного оборудования. Как видим, сфера применения БТИЗ довольно велика.

В табл. 2.4 представлены транзисторы IGBT (Motorola) на 600 и 1200В, работающих от сети переменного тока 230 или 460 В через выпрямитель по бестрансформаторной схеме. Они ориентированы на применение в инверторах для асинхронных двигателей.

Таблица 2.4. Транзисторы IGBT фирмы Motorola

Тип	$U$ , В	$I_C$ , А (90°C)	$I_C$ , А (25°C)	$U_{CE}$ , В (90°C)
MGW20N60D	600	20	32	2.90
MGW30N60	600	30	50	2.60
MGY40N60	600	40	66	2.60
MGW10N120D	1200	12	20	3.10
MGY25N120D	1200	27	42	3.10

Эти приборы могут использоваться в таких устройствах, как источники бесперебойного питания и ключевые источники питания общего назначения, работающие непосредственно от сети и при средних значениях частоты. Они оптимизированы по прямому падению напряжения и потерям при выключении и способны выдерживать токи короткого замыкания минимум 10 мкс. Для применений, где необходимо протекание обратного тока, обратный диод с быстрым восстановлением помещается в корпусе прибора. Для приложений, не требующих диода, имеются соответствующие приборы меньшей стоимости. Индекс D в конце обозначения IGBT в табл. 4.2 означает наличие диода.

#### *IGBT-модули*

В настоящее время транзисторы IGBT выпускаются, как правило, в виде модулей в прямоугольных корпусах с односторонним прижимом и охлаждением (Mitsubishi, Siemens, Semikron и др.) и таблеточном исполнении с двухсторонним охлаждением (Toshiba Semiconductor Group). Модули с односторонним охлаждением выполняются в прочном пластмассовом корпусе с паяными контактами и изолированным основанием. Все электрические контакты находятся в верхней части корпуса. Отвод тепла осуществляется через основание.

Наиболее распространённые схемы соединений IGBT- модулей приведены на рис. 2.58.

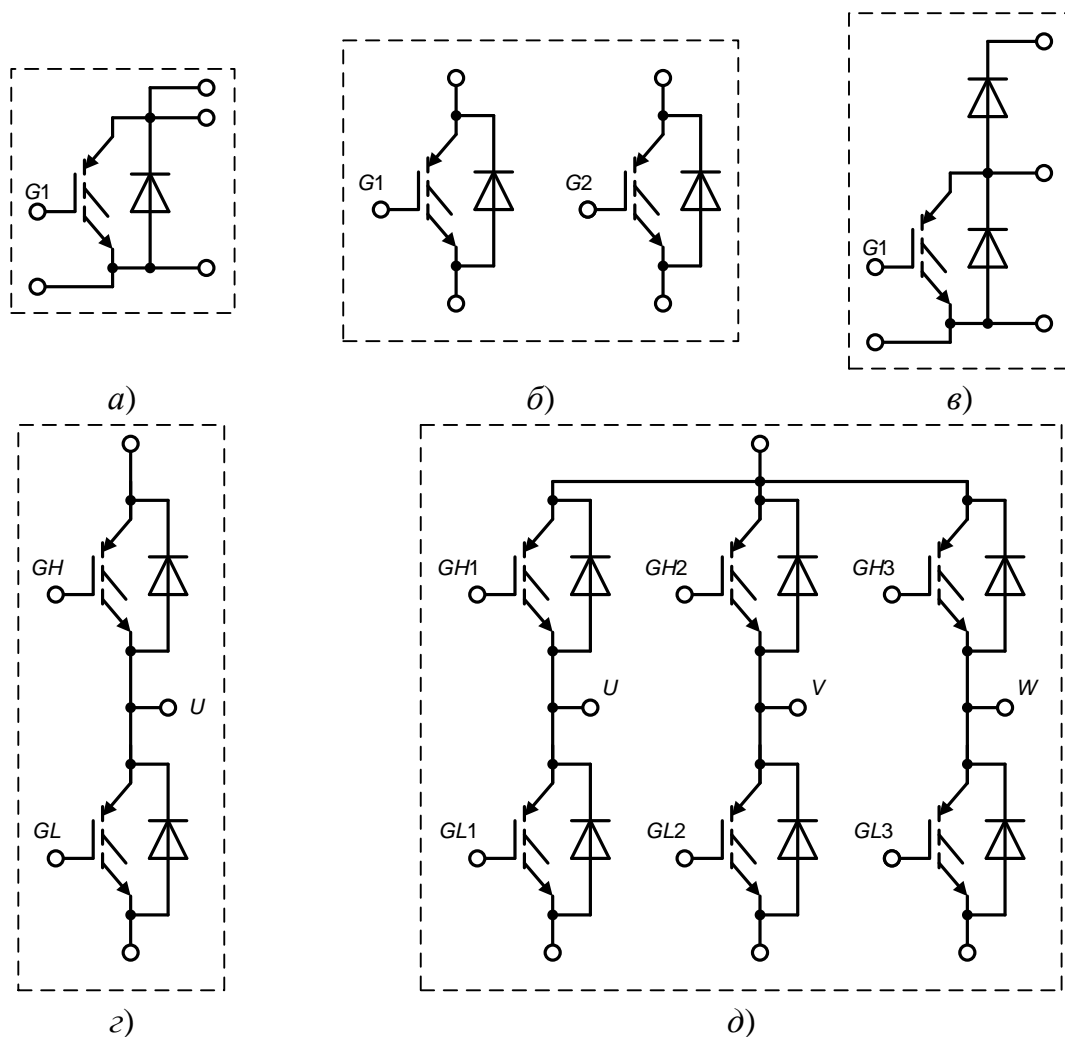


Рис. 2.58. Схемы IGBT-модулей

IGBT-модуль по внутренней электрической схеме может представлять собой:

- единственный IGBT (а),
- два независимых IGBT в одном корпусе (б),
- прерыватель (*chopper*) (в), в котором единственный IGBT последовательно соединён с диодом,
- двойной модуль (*half-bridge*) (г), где два IGBT соединены последовательно (полумост),
- однофазный или трёхфазный мост (д).
- Во всех случаях модуль содержит параллельно каждому IGBT встроенный обратный диод.

Характеристики некоторых силовых гибридных модулей Motorola, выполненных по трёхфазной мостовой схеме (рис. 2.58. д) приведены в табл. 2.5.

Основные параметры сборок из двух независимых ключей в одном корпусе, двух ключей с параллельным или последовательным соединением приведены в табл.2.6.

Для реализации достоинств ШИМ-инверторов в системах электропривода требуется не только наличие полупроводниковых ключей требуемой мощности, но и обеспечение их надежной работы. В значительной мере это связано с организацией правильного управления ключами.

При коммутации в нагрузке большого напряжения и тока необходима определенная осторожность на этапе проектирования, чтобы гарантировать надежную работу прибора. Известно, что цепь управ-

Таблица 2.5  
Трехфазные модули IGBT

IGBT модуль	I, А	U, В
MHRM6B10A60D	10	600
MHRM6B20A60D	20	600
MHRM6B5A1209D	5	1200
MHRM6B10A120D	10	1200
MHRM6B15A120D	15	1200

Таблица 2.6  
Модули из двух транзисторов IGBT

IGBT модуль	I, А	U, В
MHRM2A400A60M	400	400
MPM2A400A120C4	400	1200
MPM2A600A120C4	600	1200
MPM1A800A120C5	800	1200
MPM1A1200A120C5	1200	1200

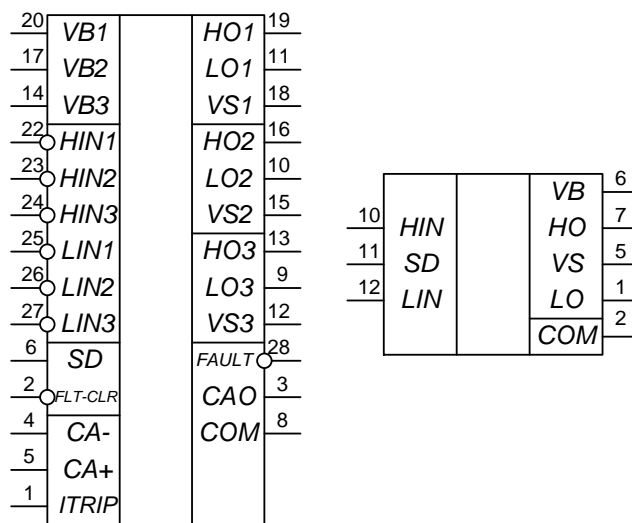
ления затвором, расположение проводников и внешних компонентов играют жизненно важную роль в управлении устройством, коммутирующим индуктивную нагрузку. Чтобы уменьшить динамические потери при включении, время коммутации должно быть очень коротким. Это требует, чтобы управление затвором было низкоимпедансного типа и способным создавать узкий импульс большого тока для заряда входной емкости затвора. Однако высокая скорость коммутации будет вызывать высокое значение  $di/dt$  и, следовательно, пере-

напряжения, связанные с паразитными индуктивностями.

Для цепей управления мощных полупроводниковых ключей разработаны специальные интегральные схемы (ИС) драйверов. Поскольку управление затвором IGBT и MOSFET во многом аналогичны, ИС драйверов применяются для управления обоими типами приборов.



В настоящее время выпускается очень большая номенклатура драйверов. На рис.2.59 показано условное обозначение микросхем драйверов IR2135 и IR2113 фирмы International Rectifier. Первая микросхема предназначена для управления трехфазным транзисторным мостом на транзисторах IGBT и MOSFET с рабочим напряжением до 1200В. Микросхема IR2113 предназначена для управления двумя транзисторами моста – верхним и нижним. Выпускаются также драйверы для управления одним транзистором.



а) б)  
Рис. 2.59. Микросхемы драйверов IR2135 (а) и IR2113 (б)

На рис. 2.60 показан вариант подключения микросхемы IR2135 для управления транзисторами, включенными по трехфазной мостовой схеме. Эта схема может использоваться для управления трехфазными асинхронными и синхронными двигателями, а также трехфазными бесколлекторными двигателями постоянного тока (Brushless DC Motor). Обмотки фаз двигателя подключаются к выводам  $U$ ,  $V$ ,  $W$ . Напряжение питания моста определяется рабочим напряжением используемого двигателя и при соответствующем выборе транзисторов может достигать 1200В.

Выходы  $HO$ ,  $LO$  предназначены для управления соответственно верхними  $H$  и нижними  $L$  ключами транзисторного моста. На входы  $HIN$  и  $LIN$  подаются логические сигналы от цифровой системы управления.

Применение соответствующих законов управления на основе широтно-импульсной модуляции позволяет регулировать скорость двигателя.

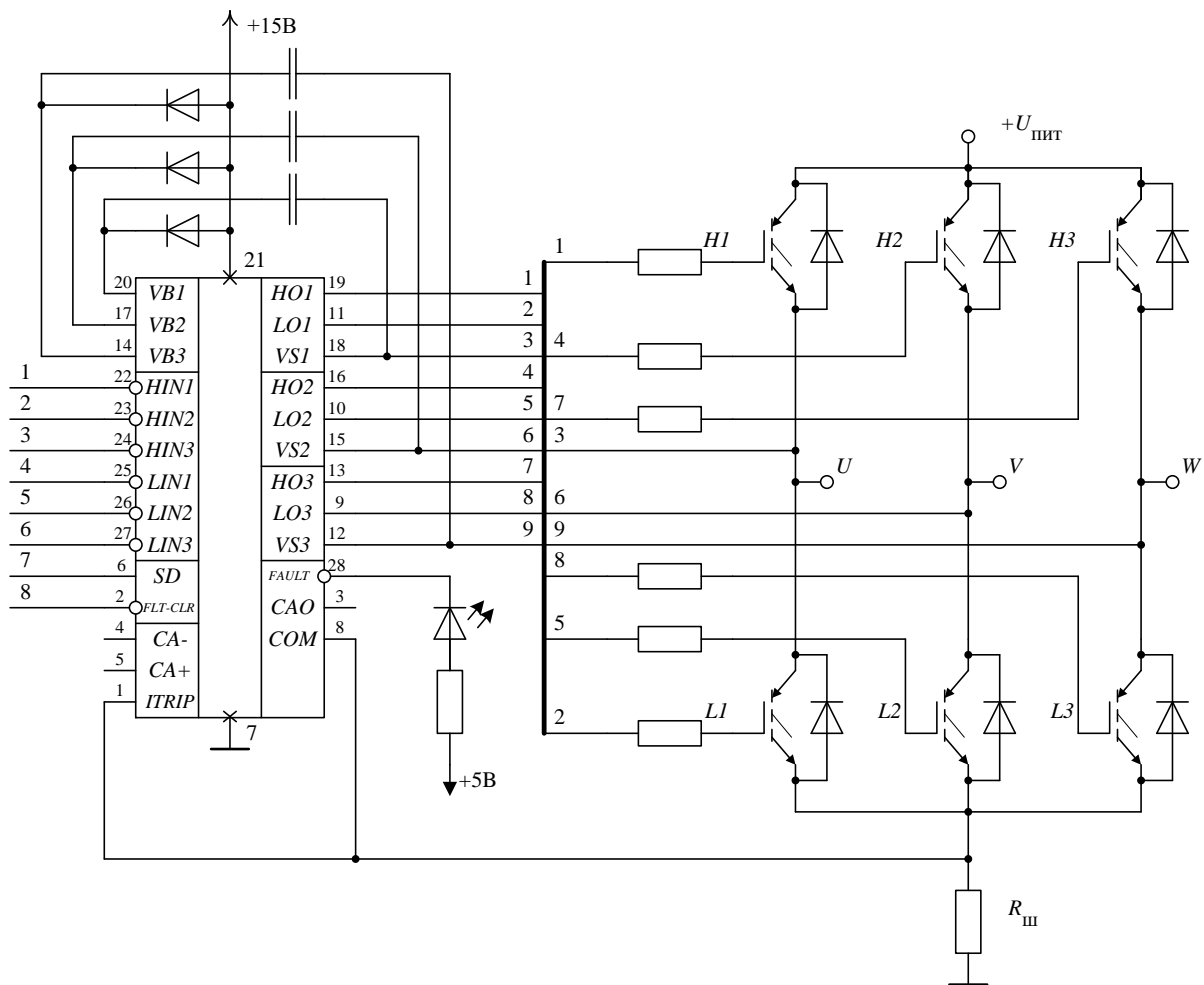


Рис.2.60. Схема подключения драйвера к трехфазному транзисторному мосту

Резистор  $R_{ш}$  выполняет функцию датчика тока, информация с которого поступает на вход *ITRIP* драйвера. При превышении тока в обмотках двигателя больше допустимого на выходах *HO*, *LO* управления транзисторами формируются сигналы на закрытие всех транзисторов, что приводит к отключению двигателя. Информация об аварийном состоянии появляется на выходе *FAULT*. На схеме к этому выходу подключен светодиод.

## 2.3. Оптоэлектронные компоненты

Оптоэлектронные приборы (ОЭП) и устройства строятся на основе эффекта взаимодействия электромагнитных волн оптического диапазона частотой  $3 \cdot 10^{11} \dots 3 \cdot 10^{17}$  Гц, (длина волны 1 мм –  $1 \cdot 10^{-3}$  мкм) с электронами [3].

Длина волны излучения определяется соотношением  $\lambda = C / f$ , где  $C$  – скорость света в вакууме.  $C = 3 \cdot 10^8$  м/с.

Время возникновения идей оптоэлектроники – 50-е годы XX века. Как самостоятельный раздел науки и техники оптоэлектроника начала формироваться в 60-е годы. С 1970-х годов возникла интегральная оптика.

Большинство современных ОЭП и устройств работает в диапазоне волн 0,5...1,5 мкм. Электрическая нейтральность фотонов обеспечивает невосприимчивость оптических каналов связи к воздействиям электромагнитных полей, т.е. обеспечивает высокую помехозащищенность; полную гальваническую развязку входных и выходных цепей; двойную (пространственную и временную) модуляцию потока оптического излучения.

Основными оптоэлектронными элементами являются:

а) источники когерентного (связанного, при сложении усиливающегося) излучения (полупроводниковые лазеры) и некогерентного излучения (излучающие диоды – инфракрасные, ультрафиолетовые и светодиоды);

б) приемники оптического излучения (фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы, фототиристоры);

в) различные оптические элементы (линзы, призмы, зеркала, поляризаторы, волоконно-оптические элементы).

Широкое применение находят в электронно-вычислительных средствах излучающие диоды, оптоэлектронные пары, оптоэлектронные переключатели, оптроны, различные классы индикаторов.

### 2.3.1. Излучающие диоды

Излучающий диод – это диод, содержащий полупроводниковый  $p-n$  переход, в котором при прохождении электрического тока гене-

рируется оптическое излучение в инфракрасной (ИК), видимой или ультрафиолетовой (УФ) области спектра.

Распространены инфракрасные и излучающие в видимой части спектра диоды (светодиоды). Прохождение тока через  $p-n$  переход в прямом направлении в светодиодах сопровождается рекомбинацией инжектированных носителей заряда. В определенных материалах ( $GaAs$ ,  $GaSb$ ,  $InAs$ ,  $InSb$  и т.д.) процесс рекомбинации сопровождается выделением кванта света – фотона, при этом возникает некогерентное свечение люминесценции. Цвет свечения зависит от материала примеси полупроводника: примесь  $ZnO$  – красный цвет, азот  $N$  – зеленый, ( $ZnO + N$ ) – желтый, оранжевый.

Сочетание света синего, зелёного и красного светодиодов даёт белый свет с высокой энергетической эффективностью, что позволило в дальнейшем создать, среди прочего, светодиодные светильники и экраны со светодиодной подсветкой.

Характеристика яркости светодиода показана на рис. 2.61, а. Условное графическое обозначение светодиода показано на рис. 2.61, б.

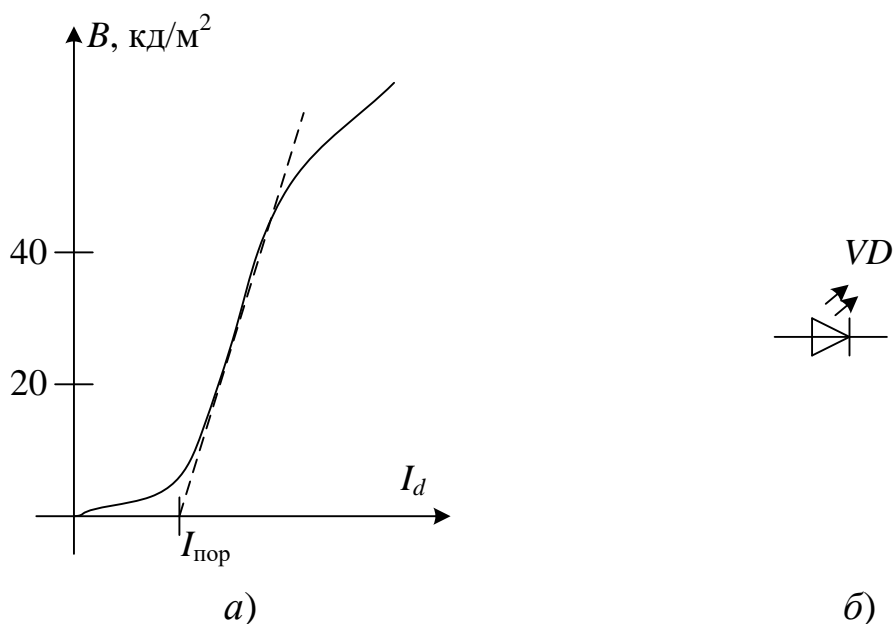


Рис. 2.61. Характеристика яркости светодиода и его условное обозначение

Характеристика яркости имеет нелинейный начальный участок, на котором яркость мала, и линейный участок, в пределах которого яркость изменяется в десятки раз. Именно этот участок чаще всего используется. На этом участке яркость свечения:  $B = B_0(I_d - I_{\text{пор}})$ ,

где  $B_0$  – чувствительность по яркости;  $I_d$  – ток светодиода;  $I_{\text{пор}}$  – пороговый ток – ток, при котором возможна линеаризация характеристики,  $I_{\text{пор}} \approx (0,1 \dots 2,5)$  мА.

Материалы для светодиодов – арсенид галлия  $GaAs$ , фосфид галлия  $GaP$  и другие.

### ***Виды и характеристики светодиодов.***

Светоизлучающие диоды различают по конструкции корпуса (таблица 2.7).

Независимо от исполнения корпуса светодиоды бывают:

- двухцветные. Они излучают одновременно два цвета. Обладают тремя контактами, один из которых общий;

- полноцветные RGB (красный-зеленый-синий). Изготавливаются из трех полупроводниковых кристаллов под общей линзой, обладают четырьмя электродами. По одному выводу для каждого полупроводникового элемента и один общий вывод. В SMD у прибора будет шесть выводов.

Пропорциональное смешение цветов дает всевозможные оттенки света. Например, при включении на 100% красного и зеленого получится желтый.

Сверхмощные (сверхяркие) светодиоды – элементы мощностью выше 1 Вт с силой тока от 300 мА. (Мощность обычных светодиодов измеряется чаще всего в милливаттах). Такие устройства светят очень ярким светом. Используются в фонариках, фарах, прожекторах и т.п.

Также светодиоды подразделяются на:

- индикаторные — маломощные;

- осветительные — приборы большой мощности;

- инфракрасные – излучают невидимый человеческому глазу инфракрасный спектр.

Инфракрасные диоды. Благодаря специально подобранным материалам проводников они испускают невидимые глазу инфракрасные лучи. Они безвредны для живых существ, но заметны для электронных систем регистрации. Востребованы во многих технических устройствах и станках во всевозможных отраслях промышленности.

Таблица 2.7. Конструкция корпуса светодиодов

	<p><b>DIP</b> – маломощные индикаторные цилиндрические элементы. Востребованы для подсветок экранов, индикации, световых гирлянд</p>
	<p>«<b>Пиранья</b>» — четырехконтактный DIP. Они крепче держатся на своем месте и меньше греются. Востребованы в автомобильной промышленности для подсветок</p>
	<p><b>SMD</b> – внешне выглядит, как параллелепипед. За счет своей надежности и универсальности востребованы во многих отраслях светотехнической промышленности</p>
	<p><b>PCB Star</b> светодиоды. Разновидность SMD.</p>
	<p><b>COB</b> – плоский SMD.</p>

Индикаторные светодиоды выступают в роли индикаторов для техники, подсветок дисплеев и т.п.

Независимо от вида светодиода характеризуются некоторыми параметрами.

Основные параметры светодиодов:

1. Сила света (яркость) – световой поток, приходящийся на единицу телесного угла в заданном направлении. Она пропорциональна силе тока, текущей сквозь элемент.

Единица измерения – Вт/ср (ватт/стерадиан) или мКд (миликанделла), яркость измеряется в Кд/м<sup>2</sup>. Для светодиодов сила света составляет (0,1 – 10) мКд.

Среди светодиодов, которые светят белым светом, выделяют яркие (20-25 милликандел) и сверхяркие (свыше 20 тысяч милликандел).

2. Цвет свечения (длина волны излучения).

Цвет свечения обусловлен химическим составом полупроводников. Некоторые вещества и соответствующие им цвета обозначены в таблице 2.8.

Таблица 2.8. Цвет свечения светодиодов

Цвет	Длина волны (нм)	Прямое напряжение (В)	Полупроводниковый материал
1	2	3	4
Инфракрасный	$\lambda > 760$	$\Delta U < 1,9$	Арсенид галлия (GaAs) Алюминия галлия арсенид (AlGaAs)
Красный	$610 < \lambda < 760$	$1,63 < \Delta U < 2,03$	Алюминия-галлия арсенид (AlGaAs) Галлия арсенид-фосфид (GaAsP) Алюминия-галлия-индия фосфид (AlGaInP) Галлия(III) фосфид (GaP)
Оранжевый	$590 < \lambda < 610$	$2,03 < \Delta U < 2,10$	Галлия фосфид-арсенид (GaAsP) Алюминия-галлия-индия фосфид (AlGaInP) Галлия(III) фосфид (GaP)

Продолжение таблицы 2.8

1	2	3	4
Жёлтый	$570 < \lambda < 590$	$2,10 < \Delta U < 2,18$	Галлия арсенид-фосфид (GaAsP) Алюминия-галлия-индия фосфид (AlGaInP) Галлия(III) фосфид (GaP)
Зелёный	$500 < \lambda < 570$	$1,9 < \Delta U < 4,0$	Индия-галлия нитрид (InGaN) / Галлия(III) нитрид (GaN) Галлия(III) фосфид (GaP) Алюминия-галлия-индия фосфид (AlGaInP) Алюминия-галлия фосфид (AlGaP)
Синий	$450 < \lambda < 500$	$2,48 < \Delta U < 3,7$	Селенид цинка (ZnSe) Индия-галлия нитрид (InGaN) Карбид кремния (SiC) в качестве подложки Кремний (Si) в качестве подложки — (в разработке)
Фиолетовый	$400 < \lambda < 450$	$2,76 < \Delta U < 4,0$	Индия-галлия нитрид (InGaN)
Пурпурный	Смесь нескольких спектральных диапазонов	$2,48 < \Delta U < 3,7$	Двойной: синий/красный диод, синий с красным люминофором, или белый с пурпурным пластиком
Ультрафиолетовый	$\lambda < 400$	$3,1 < \Delta U < 4,4$	Алмаз (235 нм) <sup>[19]</sup> Нитрид бора (215 нм) <sup>[20][21]</sup> Нитрид алюминия (AlN) (210 нм) <sup>[22]</sup> Нитрид алюминия-галлия (AlGaN) Нитрид алюминия-галлия-индия (AlGaInN) — (менее 210 нм) <sup>[23]</sup>



Белый	Широкий спектральный диапазон	$\Delta U \approx 3,5$	Сочетание трех светодиодов основных цветов (красный, синий, зелёный), либо люминофор, излучающий белый цвет под воздействием светодиода со спектром от синего до ультрафиолетового;
-------	-------------------------------	------------------------	---

3. Постоянное прямое напряжение – падение напряжения при заданном токе, равное (2 – 4) В. Превышение прямого напряжения приведет к перегоранию светодиода.

4. Сила тока. Светодиоды весьма чувствительны к силе тока. При превышении ее значения выше номинального светодиод может перегореть. Поэтому не рекомендуется превышать максимальный прямой ток элемента. Точные значения для конкретного светодиода приводятся в техническом описании.

5. Угол излучения – плоский угол, в пределах которого сила света составляет не менее половины ее максимального значения. Угол излучения определяется формой линзы, конструкцией кристалла и зависит от используемых для изготовления кристалла веществ. Может меняться от 15 до 180 градусов.

По сравнению с другими электрическими источниками света светодиоды имеют следующие отличия:

- Высокая световая отдача. Современные светодиоды сравнялись по этому параметру с натриевыми газоразрядными лампами и металлогалогенными лампами, достигнув 146 люмен на ватт.

- Высокая механическая прочность, вибростойкость (отсутствие нити накаливания и иных чувствительных составляющих).

- Длительный срок службы (при достаточном охлаждении) – от 30000 до 100000 часов (при работе 8 часов в день – 34 года). Но и он не бесконечен – при длительной работе происходит «деградация» кристалла из-за диффузии и миграции легирующих примесей и постепенное падение яркости.

- Количество циклов включения-выключения не оказывают существенного влияния на срок службы светодиодов (в отличие от

традиционных источников света – ламп накаливания, газоразрядных ламп).

- Цветовая температура современных белых светодиодов может быть различной – от тёплого белого ~2700 К до холодного белого ~6500 К.

- Спектральная чистота, достигаемая не фильтрами, а принципом действия прибора.

- Отсутствие инерционности – включаются сразу на полную яркость, в то время как у ртутно-люминофорных (люминесцентных-экономичных) ламп время включения от 1 с до 1 мин, а яркость увеличивается от 30% до 100% за 3...10 минут, в зависимости от температуры окружающей среды.

- Различный угол излучения – от 15 до 180 угловых градусов.

- Низкая стоимость индикаторных светодиодов.

- Безопасность – не требуются высокие напряжения, при должном охлаждении низкая температура светодиода, обычно не превышающая 60°C.

- Нечувствительность к низким и очень низким температурам. Однако, высокие температуры противопоказаны светодиоду, как и любым полупроводниковым приборам.

- Экологичность – отсутствие ртути, фосфора и ультрафиолетового излучения в отличие от люминесцентных ламп.

### **2.3.2. Фотодиоды**

Фотодиод (ФД) – полупроводниковый диод, обладающий свойством односторонней проводимости, возникающей при воздействии на него оптического излучения. ФД используется для преобразования оптического сигнала в электрический. Наиболее распространены *p-i-n* диоды, в которых толщина высокоомной *i*-области выбирается так, чтобы обеспечить наилучшие свойства (чувствительность и быстродействие) прибора (рис.2.62). *p-i-n* структура образуется, если области *p* и *n* разделены высокоомным слоем с собственной (*i*) проводимостью для снижения напряженности поля в переходе.

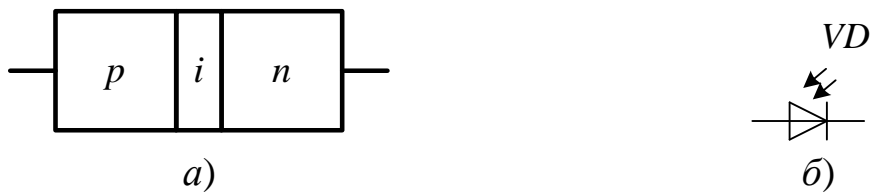


Рис. 2.62. Структура и УГО фотодиода

Действие фотодиода основано на поглощении света вблизи области  $p$ - $n$  перехода, в результате чего генерируются новые носители заряда (электронно-дырочные пары).

Различают два режима работы ФД:

а) фотодиодный, когда имеется источник питания, создающий обратное смещение;

б) вентильный (фотогенераторный), когда такой источник отсутствует.

В фотодиодном режиме возникающие в результате фотогенерации носители зарядов приводят к возрастанию обратного тока, который зависит от интенсивности падающего излучения и практически не зависит от величины обратного напряжения (рис. 2.63).

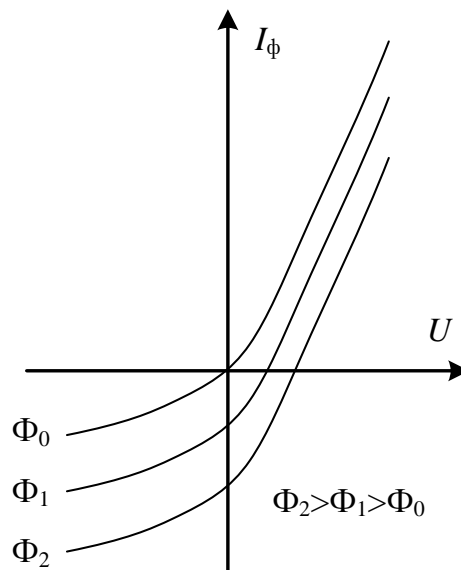


Рис. 2.63. Вольтамперная характеристика ФД в фотодиодном режиме

В вентильном (фотогенераторном) режиме ФД используется как фотогенератор (источник фотоЭДС, фотоэлемент). ФотоЭДС зависит от светового потока и свойств полупроводника.

Основные характеристики и параметры фотодиода:

1. Энергетические характеристики  $I_{\Phi} = f(\Phi)$  – зависимости фототока от светового потока. При работе в генераторном режиме  $I_{\Phi} = f(\Phi)$ , если  $R_{\text{н}}=0$ . С ростом  $R_{\text{н}}$  характеристики искривляются.

2. Спектральные характеристики фотодиода отражают чувствительность ФД от частоты (длины волны) и зависят от материала, из которого они изготовлены.

Относительная чувствительность  $S(\lambda)$  имеют чётко выраженный максимум, соответствующий определённой длине волны облучения для каждого материала (рис. 2.64).

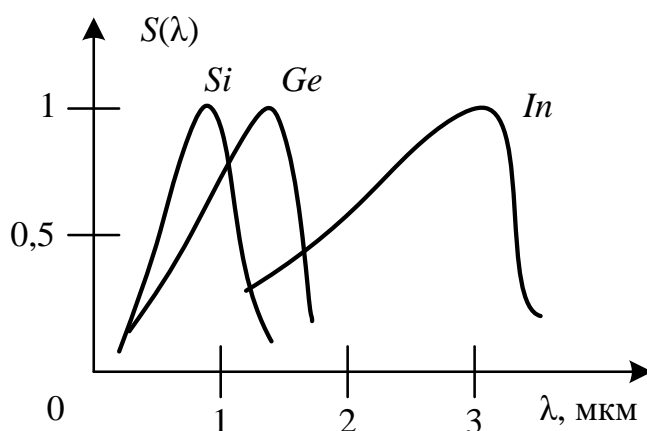


Рис. 2.64. Вид спектральных характеристик фотодиода

Спектральные характеристики фотодиода аналогичны характеристикам фоторезистора.

3. Граничная частота – частота, при которой интегральная чувствительность уменьшается в  $\sqrt{2}$  раз по сравнению со статическим значением  $f_{\text{гр}} \approx 10$  МГц.

Сейчас разработаны ФД на основе p–i–n-структур, барьеров Шоттки, лавинные ФД, предназначенные в основном для повышения быстродействия и увеличения чувствительности.

### 2.3.3. Фототранзисторы

Фототранзистор (ФТ) – транзистор (обычно биполярный), в котором управление коллекторным током осуществляется на основе внутреннего фотоэффекта. ФТ служит для преобразования световых сигналов в электрические с одновременным усилением последних.

Включение ФТ во внешнюю электрическую цепь подобно включению транзистора по схеме с общим эмиттером, обычно с нулевым током базы (вывод базы отключен от внешней цепи). Такой режим характерен только для ФТ и носит название «режим с плавающей базой».

Фототранзистор сделан так, что излучение попадает на область базы. В результате поглощения энергии в базе генерируются электронно-дырочные пары, участвующие в создании фототока. При отсутствии облучения ( $\Phi = 0$ ) между коллектором и эмиттером течет темновой ток, т.е. обратный ток  $p$ - $n$  перехода.

Основные характеристики и параметры фототранзистора:

1. ВАХ фототранзистора подобны ВАХ транзистора в схеме с ОЭ, но параметром служит не ток базы, а поток  $\Phi$ .

2. Энергетические  $I_{\Phi} = f(\Phi)$  и спектральные  $S(\lambda)$  характеристики подобны характеристикам ФД.

3. Коэффициент усиления по фототоку:  $K_{\text{уф}} = (1 + \beta)$ .

4. Ширина полосы пропускания –  $10^4 \dots 10^5$  Гц.

5. Значение темнового тока (при  $\Phi = 0$ ).

6. Токовая чувствительность  $S_{\text{инт}} = \frac{I_{\Phi}}{\Phi}$ .

В качестве высокочувствительных фотоприемников используются также полевые фототранзисторы, имеющие более широкую полосу пропускания  $10^6 \dots 10^8$  Гц. Используются также фототиристоры.

#### **2.3.4. Оптроны**

Оптроны – это полупроводниковые приборы, состоящие из излучателя света и фотоприемника, взаимодействующих друг с другом и помещенных в общем корпусе. Оптроны используют для оптической связи отдельных частей радиоэлектронных устройств. С помощью оптронов обеспечивается электрическая развязка между частями устройства (гальваническое разделение цепей).

В оптронах между источником излучения и фотоприемником имеется среда, выполняющая функции световода. Эта среда должна иметь большой коэффициент преломления для согласования с большим коэффициентом преломления материалов, служащих источниками света. Среда с большим коэффициентом преломления называется

иммерсионными Это свинцовые и селеновые стёкла с коэффициентами преломления соответственно 1,7...1,9 и 2,4...2,6.

Оптроны широко применяются в самых различных устройствах автоматики и электронной техники. Конструкции и параметры оптронов постоянно совершенствуются с целью уменьшения потребления энергии источниками излучения и расширения функциональных возможностей фотоприёмной части.

Примеры обозначений оптронов показаны на рис. 2.65.

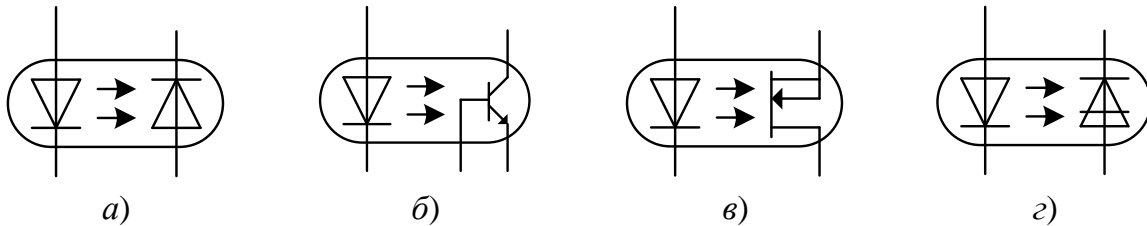


Рис. 2.65. Условные изображения оптронов разных типов  
 а) диодный оптрон; б) транзисторный оптрон;  
 в) транзисторный МОП оптрон; г) тиристорный оптрон;

Сопротивление между входной и выходной цепями оптронов составляет ( $10^{13} - 10^{15}$ ) Ом. Диодные, транзисторные и тиристорные оптроны используют в основном в ключевых режимах. Резисторный оптрон чаще всего применяют в усилительных устройствах. Сейчас разработаны оптроны, в которых совмещаются функции простейших оптронов и электронных преобразователей (усилителей), выполняемых на одной подложке. Условное графическое изображение такого оптрона показано на рис. 2.66.

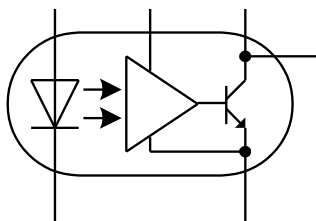


Рис. 2.66. Пример УГО оптрона с усилительным элементом на выходе

Промышленностью серийно выпускаются оптоэлектронные коммутаторы сигналов, состоящие из арсенид-галлиевого излучателя, кремниевого фотодиода и интегрального усилителя, обеспечивающего выходные уровни напряжения, достаточные для управления логическими элементами ТТЛ-серий (серии К249ЛП1, К262КП1 и др.). Входной ток оптоэлектронных коммутаторов не превышает 20 мА, ёмкость между входом и выходом – не более 5 пФ.

## Контрольные вопросы

1. Какие типы диодов Вы знаете? Приведите их условные обозначения.
2. Какие основные параметры выпрямительных диодов?
3. Как изменится положение вольтамперной характеристики диода при повышении температуры?
4. Какие виды пробоя  $p-n$  перехода существуют и в чем их отличие?
5. Каково соотношение между прямым  $R_{пр}$  и обратным сопротивлением  $R_{обр}$  полупроводникового диода?
6. С какой целью мощные диоды изготавливают в массивных металлических корпусах?
7. Какое преимущество германиевых выпрямительных диодов перед кремниевыми?
8. Какие существуют особенности диодов Шоттки?
9. Какие существуют схемы выпрямителей переменного тока?
10. Какое назначение фильтра, применяемого в выпрямителях?
11. Приведите основное отличие импульсных диодов.
12. Какие параметры используются для оценки инерционных свойств импульсных диодов?
13. Приведите основные специфические параметры импульсных диодов.
14. Из какого материала изготавливают стабилитроны?
15. Какая величина наименьшего напряжения стабилизации стабилитронов?
16. Какая величина максимального напряжения стабилизации стабилитронов?
17. В чем отличие стабилитрона от стабистора?
18. Что определяет отношение  $I_{п} / I_{в}$  туннельного диода?
19. Приведите основное отличие варикапа.
20. Какая максимальная рабочая температура для германиевых полупроводниковых приборов?
21. Какова величина сопротивления тиристора в закрытом состоянии?
22. В чем отличие работы тринистора от динистора?

23. Какова величина сопротивление тиристора в открытом состоянии?
24. Приведите основное отличие тристора от симистора?
25. Какие существуют способы включения тиристоров?
26. Какие существуют способы выключения тиристоров?
27. Какие структуры имеет биполярный транзистор?
28. В чем заключается принцип работы биполярного транзистора?
29. Какие существуют режимы работы биполярного транзистора?
30. Назовите основные параметры биполярных транзисторов.
31. Какие существуют схемы включения биполярного транзистора?
32. Какая схема включения биполярного транзистора имеет наименьшее входное сопротивление?
33. Как определяется коэффициент передачи тока эмиттера?
34. Как определяется коэффициент передачи тока базы?
35. Каким соотношением связаны между собой коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  у биполярного транзистора?
36. При какой схеме включения транзистора коэффициент усиления по мощности меньше или равен единице?
37. Как определяется коэффициент передачи по току составного транзистора?
38. В чем заключается принцип работы биполярного транзистора?
39. Какие выводы имеет полевой транзистор?
40. Какие существуют разновидности полевых транзисторов?
41. В чем отличие принципа действия полевого транзистора с управляющим *p-n*- переходом и транзисторы с изолированным затвором?
42. Какие существуют схемы включения полевого транзистора?
43. Какие существуют разновидности полевых транзисторов с изолированным затвором??
44. Назовите основные параметры полевых транзисторов.
45. Какие основные достоинства полевых транзисторов?
46. Перечислите особенности применения полевых транзисторов.
47. Назовите разновидности силовых транзисторов.



48. В чем принципиальное отличие транзисторов HEXFET?
49. При каких максимальных токах и напряжениях могут работать транзисторы MOSFET?
50. Какую внутреннюю структуру имеет транзистор IGBT?
51. При каких максимальных токах и напряжениях могут работать транзисторы IGBT?
52. Назовите основные области применения транзисторов IGBT.
53. Что представляют собой IGBT- модули?
54. Какие устройства применяются для управления силовыми транзисторами?
55. На каком принципе работают оптоэлектронные приборы?
56. Чем определяется цвет свечения светодиодов?
57. Как получается белый цвет свечения у светодиодов?
58. Назовите основные параметры светодиодов.
59. Назовите достоинства светодиодов перед другими электрическими источниками света.
60. Какие режимы работы существуют у фотодиодов?
61. Чем определяется чувствительность фотодиода?
62. Какое основное назначение оптронов?

### 3. УСИЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА НА ТРАНЗИСТОРАХ

Области, где используются транзисторы, зависят от технических характеристик последних. Транзисторы разного конструктивного исполнения рассчитаны на работу в ключевом или усилительном режимах.

*Ключевой режим.* Полупроводниковый транзистор в этом случае находится в одном из двух состояний – открытом или закрытом. Это экономичный вариант, поскольку для руководства значительными нагрузками требуются небольшие управляющие токи.

*Усилительный (динамический).* В основе этого режима лежит принцип значительного усиления выходного сигнала при незначительном повышении управляющего сигнала.

Транзисторы применяются в очень многих технических устройствах, таких как усилительные схемы, генераторы сигналов, электронные ключи.

Во всех устройствах усиление сигнала необходимо. Во-первых, электрические сигналы имеют естественное затухание. Во-вторых, довольно часто бывает, что амплитуды одного из параметров сигнала недостаточно для корректной работы устройства. Информация передается с помощью электрических сигналов. Чтобы доставка была гарантированной и качество информации высоким, нам необходимо усиливать сигналы.

Транзисторы способны влиять не только на амплитуду, но и на форму электрического сигнала. В зависимости от требуемой формы генерируемого сигнала в генераторе будет установлен соответствующий тип полупроводникового прибора. В зависимости от типа генератора транзистор может использоваться либо в ключевом (генерация прямоугольных сигналов), либо в усилительном режиме (генерация сигналов произвольной формы).

Электронные ключи нужны для управления силой тока в цепи. В состав этих ключей входит множество транзисторов. Электронные ключи являются одним из важнейших элементов схем. На их основе работают компьютеры, телевизоры и другие электрические приборы, без которых в современной жизни не обойтись.

Реле и тиристоры имеют большой коэффициент усиления мощности, чем транзисторы, но работают только в ключевом (переключа-тельном) режиме.

### 3.1. Схемы питания усилительных каскадов

Для нормальной работы транзисторного каскада необходимо подать питание в выходную цепь, а для выбора рабочей точки на ха-рактеристике усилительного прибора нужно подать напряжение сме-щения на вход.

Питание выходных цепей осуществляется либо непосредственно от источника постоянного напряжения, либо через развязывающие фильтры, как показано на рис. 3.1.

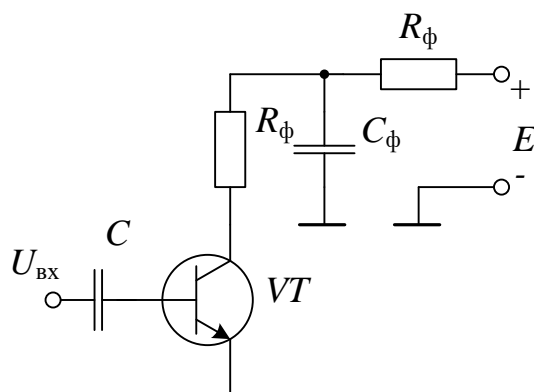


Рис. 3.1. Схема подключения питания

Простейший способ подачи напряжения смещения показан на рис. 3.2, а (схема с фиксированным током базы). Сопротивление  $R_6$  много больше сопротивления участка база-эмиттер, при открытом эмиттерном переходе, поэтому ток базы  $I_{Б0} \approx \frac{E}{R_6}$ . Этот ток создает напряжение смещения на базе. Такой способ подачи смещения применим только в каскадах, работающих без отсечки тока.

Схема с фиксированным напряжением база-эмиттер (рис. 3.2, б) обеспечивает смещение  $U_{БЭ} \approx \frac{ER_2}{R_1 + R_2}$ . Сопротивление делителя тока выбирается так, чтобы ток через резистор  $R_2$  был в несколько раз больше тока базы.

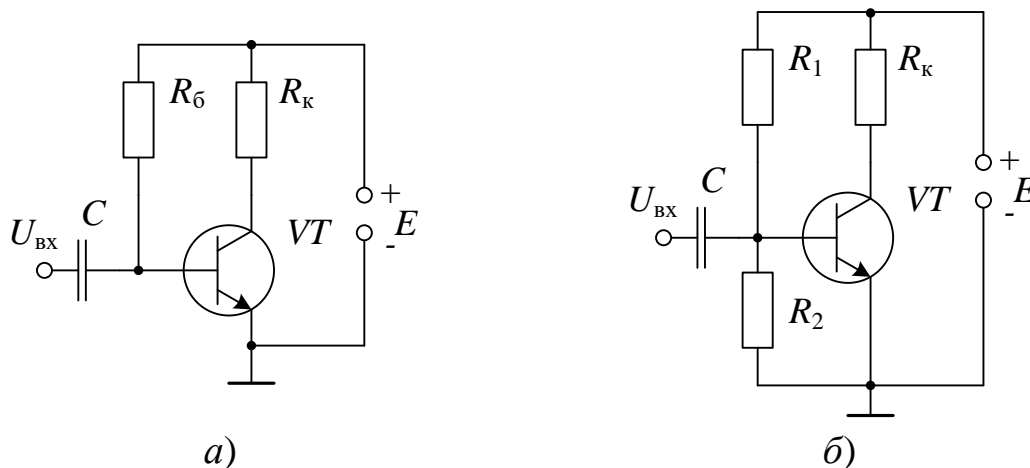


Рис. 3.2. Выбор рабочей точки биполярного транзистора

В схемах на полевых транзисторах сопротивление между затвором и истоком весьма велико, что позволяет получать смещение за счёт протекания тока истока через резистор  $R_{И}$  (рис. 3.3) и подавать его на затвор через большое сопротивление  $R_3$ . Используют также схему с делителем напряжения  $R_3, R_Д$ .

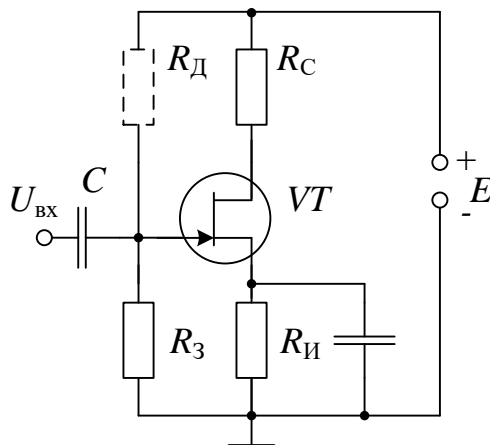


Рис. 3.3. Выбор рабочей точки полевого транзистора

### 3.2. Основные характеристики усилительных устройств

Задача усилительного устройства (УУ) – получить на выходе (на нагрузке) сигнал с большей мощностью, чем входной сигнал, но повторяющий закон изменения входного сигнала.

Математически усиление – это умножение амплитуды тока, напряжения и мощности на постоянную величину  $K$ , называемую коэффициентом усиления или коэффициентом передачи:  $U_{ВЫХ} = KU_{ВХ}$ .

Физически процесс усиления – это преобразование постоянной мощности источника питания в мощность переменного тока в соответствии с законом изменения входного сигнала.

Обязательными элементами УУ являются усилительный электронный прибор (транзистор биполярный, транзистор полевой, и др.), источники питания, нагрузка и источник входного сигнала.

Классификация усилителей возможна по следующим признакам:

- по виду усиливаемых сигналов существуют аналоговые и импульсные усилители;
- по частотному признаку – усилители сигналов низкой (звуковой) частоты, усилители высокой частоты, узкополосные и широкополосные;
- по назначению различают усилители мощности, тока и напряжения (которые тоже усиливают мощность сигнала);
- по виду усилительных элементов (на биполярных транзисторах, на полевых транзисторах), причем усилители на транзисторах могут быть как в дискретном, так и в интегральном исполнении. Для оценки и сравнения УУ используют следующие параметры.

*Коэффициенты передачи по напряжению*  $K_U = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}$ , по току

$K_I = \frac{I_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{ВХ}}}$ , и по мощности  $K_P = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}}$ , измеряемые на некоторой частоте. Коэффициент передачи часто измеряется в децибелах ( $20\lg K_I$ ,  $20\lg K_U$ ,  $20\lg K_P$ ).

Коэффициент передачи зависит от частоты и является комплексной величиной.

*Нормированной амплитудно-частотной характеристикой* (АЧХ) называют зависимость  $Y = \frac{K(f)}{K}$ , где  $K$  – максимальный ко-

эффициент передачи на какой-либо частоте. Неравное усиление на разных частотах приводит к частотным искажениям, которые оценивают коэффициентом частотных искажений  $M = \frac{K}{K(\omega)} = \frac{1}{Y}$ . Величи-

ны  $Y$  и  $M$  обычно измеряют в децибелах.

Полосой пропускания усилителя называют полосу частот от  $f_n$  до  $f_v$  (рис. 3.4), на границах которой значения  $Y$  уменьшаются в  $\sqrt{2}$  раз (на 3 дБ).

Фазочастотные (фазовые) искажения возникают по причине различных фазовых сдвигов для разных частот спектра. Фазовая характеристика реального усилителя имеет вид, как на рисунке 3.5. Чтобы не было фазовых искажений, ФЧХ должна быть линейной (штриховая линия на рисунке).

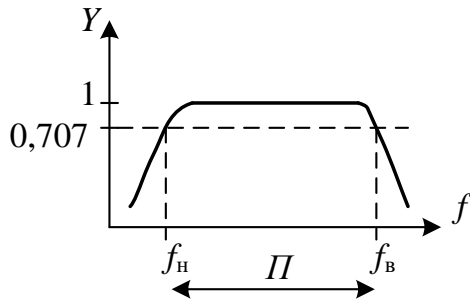


Рис. 3.4. Полоса пропускания

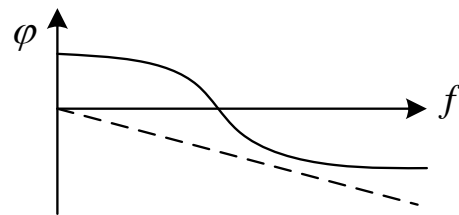


Рис. 3.5. Фазовая характеристика

Для оценки коэффициента полезного действия (КПД) используют электрический КПД  $\eta$  и полный КПД  $\eta_{\text{п}}$ :  $\eta = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_0} = \frac{1}{Y}$ ;

$\eta_{\text{п}} = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{общ}}}$ , где  $P_0$  — мощность, потребляемая от источника питания в выходной цепи,  $P_{\text{общ}}$  — полная потребляемая мощность от всех источников питания.

Нелинейные искажения возникают из-за нелинейности вольтамперных характеристик электронных приборов и проявляются в искажении формы синусоидальных сигналов за счёт появления гармоник и комбинационных частот. Уровень нелинейных искажений оценивается коэффициентом нелинейных искажений (коэффициентом гармоник):

$$k_2 = \sqrt{\frac{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2}{U_1^2}} 100\%, \text{ где } U_i \text{ — амплитуды } i\text{-тых гармоник.}$$

### 3.3. Режимы работы усилителей

Режим работы усилителя определяется положением рабочей точки на статических характеристиках усилительного прибора. Существует также классификация усилителей по режиму работы: ключевой и токовый режимы работы. Режим работы усилителя называется классом работы. Выбор рабочей точки может значительно влиять на основные характеристики усилителя, такие как коэффициент усиления, нелинейные искажения и к.п.д. Наиболее распространенная классификация усилителей приведена на рисунке 3.6 [8].

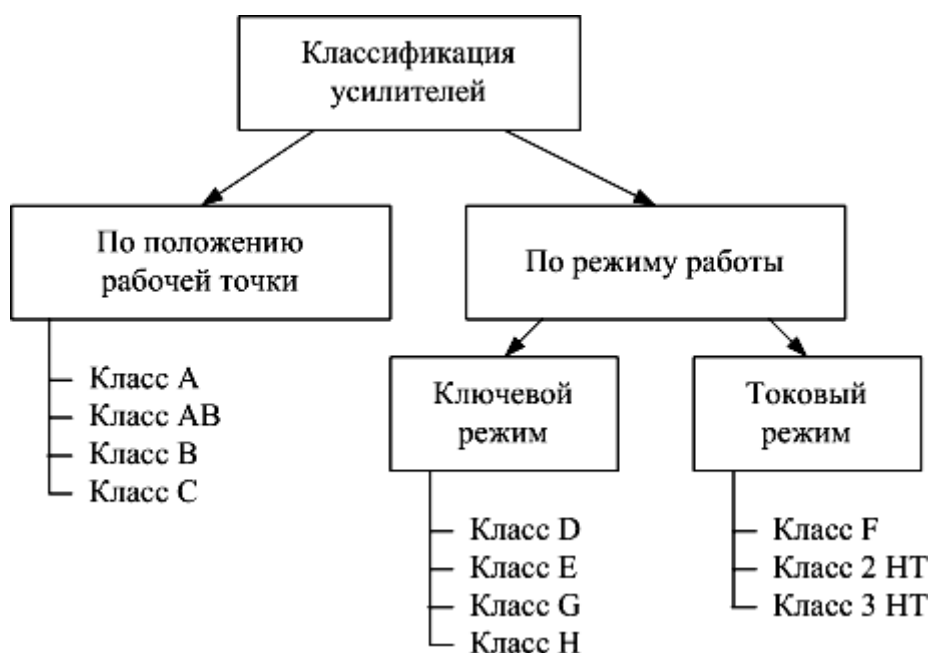


Рис. 3.6. Классификация усилителей

#### *Усилители класса А*

Основная задача любого усилителя – усиление входного сигнала без искажений, то есть, чтобы выходной сигнал по форме в точности повторял входной. То есть необходимо, чтобы транзисторы открывались и закрывались по строго линейному закону, строго пропорционально входному сигналу.

Но транзистор может так работать не во всем своем диапазоне. Например, если входной сигнал слишком маленький, что соответствует начальному участку входной и выходной характеристик (см. рис. 2. 34), то транзистор на него почти не реагирует, зато при достижении определенного уровня начинает резко открываться и с этого

момента реагирует на изменение управляющего сигнала почти что линейно. Значит, для того, чтобы искажений было как можно меньше, транзистор придется все время держать в приоткрытом состоянии. Это называется задать смещение транзистора или выбрать его рабочую точку на характеристиках. Такой режим соответствует работе усилителя в классе А. Класс А обеспечивает очень маленькие искажения сигнала.

Рассмотрим пример усилителя, реализованного на транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером (рис. 3.7).

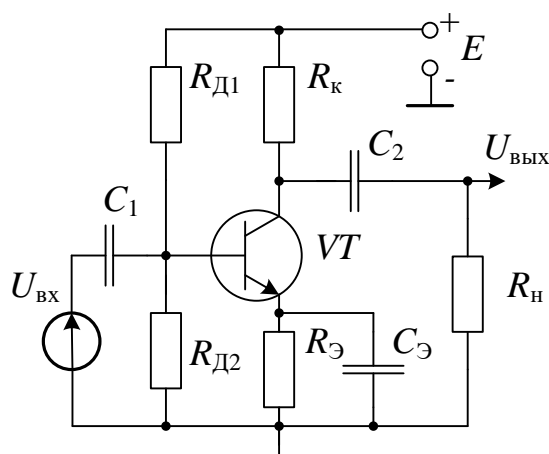


Рис. 3.7. Усилитель класса А

Рабочая точка выбирается в середине линейного участка статической характеристики. Она задается с помощью резисторов базового делителя напряжения  $R_{Д1}$ ,  $R_{Д2}$ , которые формируют напряжение смещения на базе транзистора. Таким способом задают режим покоя транзистора, при котором в нем протекают только постоянные токи покоя базы, коллектора и эмиттера при отсутствии входного сигнала. Соответственно на его базе, коллекторе и эмиттере действуют постоянные напряжения покоя. Резистор  $R_{Э}$  и делитель  $R_{Д1}$ ,  $R_{Д2}$  составляют цепь отрицательной обратной связи (ООС), предназначенную для термостабилизации режима покоя транзистора при изменении его температуры. Включение резистора  $R_{Э}$  в цепь эмиттера изменяет работу каскада и по переменному сигналу. Переменный ток эмиттера создает на резисторе  $R_{Э}$  падение напряжения, которое уменьшает усиливаемое напряжение, подводимое к базе транзистора. При этом снижается и коэффициент усиления каскада, поскольку действует ООС по переменному току. Для ее исключения резистор  $R_{Э}$  шунтируют конденсатором  $C_{Э}$  достаточно большой емкости. Поскольку реактив-



ное сопротивление конденсатора мало, то переменный ток протекает по нему и не создает потерь напряжения на резисторе  $R_{\text{Э}}$ .

В режиме покоя транзистора расчет каскада по постоянному току (входной сигнал отключен) проводят графоаналитическим методом с использованием статических выходных и входных ВАХ транзистора (рис. 3.8).

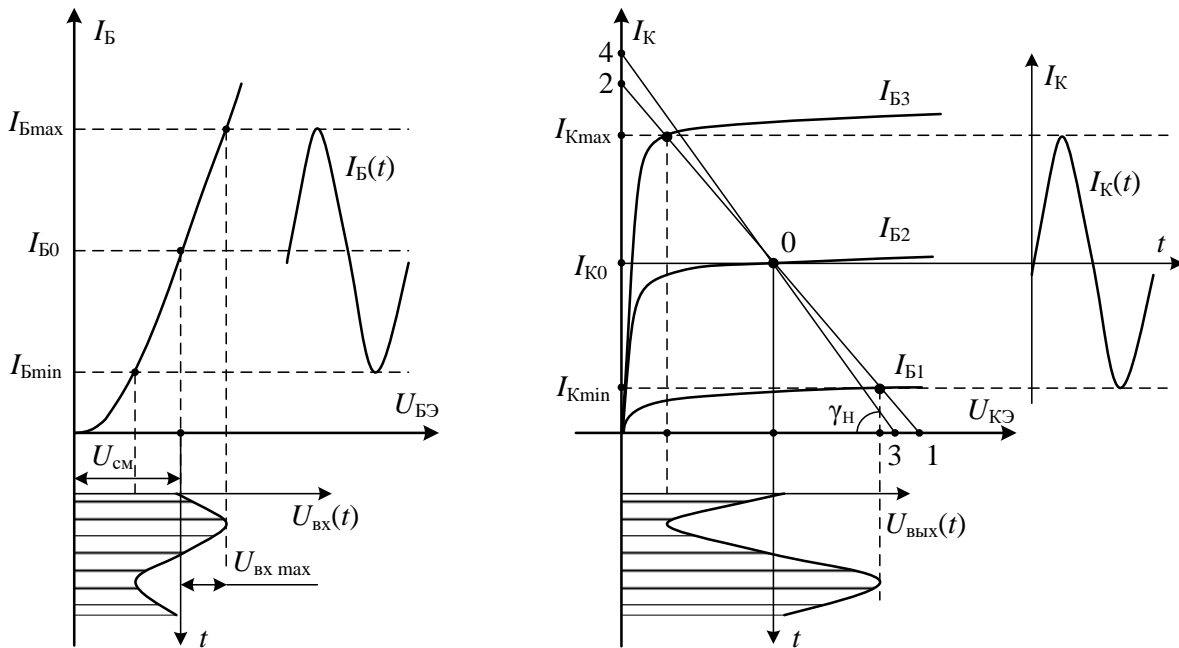


Рис. 3.8. Характеристики усилителя класса А

При расчетах на выходных характеристиках проводят линию нагрузки по постоянному току (линия 1-2), положение которой определяется вторым законом Кирхгофа для коллекторной цепи каскада

$$E = U_{\text{КП}} + I_{\text{КП}}(R_{\text{К}} + R_{\text{Э}}),$$

где  $U_{\text{КП}}$  и  $I_{\text{КП}}$  соответственно напряжение и ток покоя.

Линию нагрузки строят по двум точкам, характеризующим режимы холостого хода (точка 1) и короткого замыкания (точка 2) в коллекторной цепи транзистора. Для точки 1: ток и напряжение холостого хода  $I_{\text{КХ}}=0$ ,  $U_{\text{КХ}}=E$ ; для точки 2: напряжение и ток короткого замыкания  $U_{\text{КЗ}}=0$ ,  $I_{\text{КЗ}}=E/(R_{\text{К}}+R_{\text{Э}})$ . Точка пересечения одной из выходных характеристик с линией нагрузки называют точкой покоя (точка 0). Выходная характеристика соответствует току базы в середине линейного участка статической входной характеристики (в данном случае это ток базы  $I_{\text{Б2}}$ ).

Используя координаты точки покоя  $0$ , можно определить ток коллектора покоя  $I_{K0}$ , напряжение коллектора покоя  $U_{K0}$  и падение напряжения на резисторе  $R_K$ , равное  $U_{R_K} = I_{K0} \cdot R_K$ . При этом транзистор работает в активном режиме.

Для определения параметров выходного сигнала в динамическом режиме усиления (с подключенными входным сигналом и нагрузкой) используют линию нагрузки по переменному току (динамическую линию нагрузки). Если учесть, что сопротивления источника питания  $E$  и конденсатора  $C_2$  по переменному току малы, то сопротивление нагрузки по переменному току будет определяться параллельно включенными резисторами  $R_K$  и  $R_H$

$$R_{KH} = \frac{R_K R_H}{R_K + R_H}.$$

В режиме усиления сигнала токи и напряжения транзистора состоят из суммы постоянных и переменных составляющих, поэтому линия нагрузки по переменному току также пройдет через точку  $0$ . И поскольку  $R_{KH} < R_K$ , то линия будет находиться под углом  $\gamma_H = \text{arctg}(R_{KH})$ , большим, чем угол  $\gamma$ . Для ее построения на оси абсцисс отмечают точку  $3$ , где напряжение равно сумме  $U_{KП} + I_{KП} R_{KH}$ , и через нее и точку  $0$  проводят прямую (штриховая линия 3–4).

Вначале принцип действия каскада с ОЭ рассмотрим при отключенной нагрузке  $R_H$  (режим холостого хода по переменному току). При подаче на вход каскада переменного напряжения  $U_{вх}(t)$  переменный ток базы  $I_B$  будет изменяться в соответствии с входной характеристикой. Одновременно и по такому же закону станет менять свои значения переменный ток коллектора. Так, например, при увеличении амплитуды входного напряжения возрастет ток базы  $I_B$ . Поскольку ток коллектора связан с током базы как  $I_K = \beta I_B$  ( $\beta$  - коэффициент передачи по току транзистора,  $\beta = 35 \dots 100$ ), то он тоже возрастет. В результате увеличивается падение переменного напряжения на резисторе  $R_K$ , а переменное напряжение на коллекторе  $U_{KЭ}$  уменьшится. При уменьшении же входного напряжения картина меняется на обратную. Из данного анализа следует, что каскад с ОЭ наряду с усилением мощности изменяет (инвертирует) фазу входного сигнала на  $180^\circ$ . Точно так же работает схема и при подключении нагрузки  $R_H$ ,

лишь переменный коллекторный ток при этом распределяется между резисторами  $R_K$  и  $R_H$ , что естественно снижает усиление.

При работе усилителя в классе А переменный ток протекает в выходной цепи в течение всего периода, т.е. в процессе работы не происходит запираение транзистора (отсечки выходного тока). От источника питания непрерывно, независимо от уровня входного сигнала, потребляется мощность, пропорциональная току в рабочей точке транзистора (току покоя). Из-за этого транзисторы довольно сильно нагреваются, и значительная часть энергии от блока питания уходит в тепло, а КПД усилителя составляет в лучшем случае всего лишь около 20-35%.

Преимущество класса А это высокая точность воспроизведения и низкие искажения

Класс А применяется, как правило, в входных каскадах мало-мощных линейных усилителях на частотах звукового диапазона и позволяет достичь высокого качества звучания.

### ***Усилители класса В***

Усилители класса В были созданы для решения проблем, связанных с низким КПД и повышенным уровнем перегрева, которые свойственны усилителям класса А.

Режим В характеризуется тем, что смещение рабочей точки отсутствует и, следовательно, ток покоя равен нулю. В таком режиме транзистор проводит только половину формы сигнала. На рис. 3.9 показана входная статическая характеристика. При отрицательном входном сигнале транзистор закрывается и ток базы, а следовательно и ток коллектора будет отсутствовать. Входная характеристика в начале до некоторого порогового значения имеет нелинейный участок. В результате при малом уровне входного сигнала возникают существенные нелинейные искажения. Величина порогового напряжения имеет величину от -0,7 В до +0,7 В для транзисторов *p-n-p* и *n-p-n* соответственно.

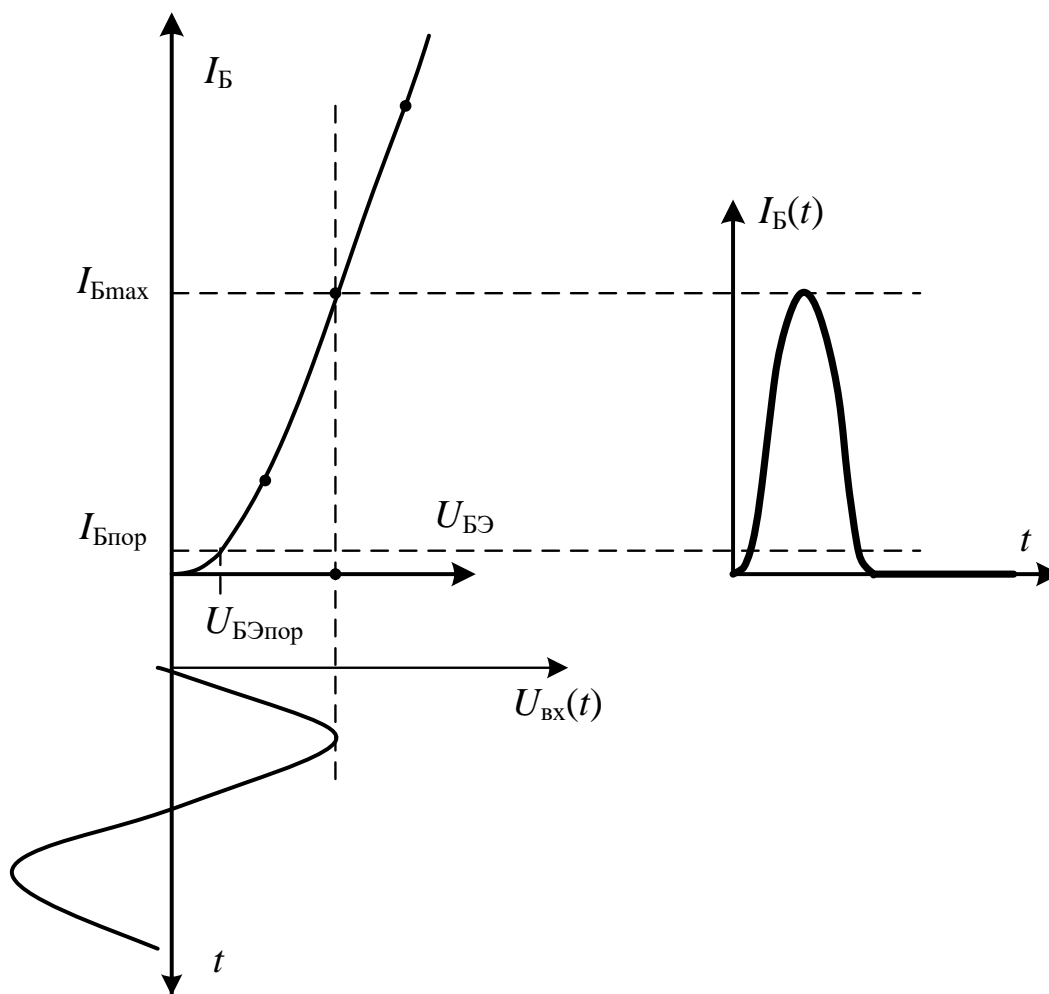


Рис. 3.9. Характеристики усилителя класса В

Усилители класса В строят не на одном транзисторе, а по так называемым двухтактным схемам, т.е. с двумя транзисторами. Поскольку в схеме используются транзисторы разных типов ( $p-n-p$  и  $n-p-n$ ), то один из них будет открываться, когда сигнал положительный, а другой – когда сигнал отрицательный. То есть один будет усиливать положительную полуволну сигнала, а другой – отрицательную, на нагрузке эти полуволны суммируются (рис. 3.10). В зоне порогового значения напряжения появляются искажение в виде ступеньки. Соответственно, это делает усилители класса В практически непригодными для применения в прецизионных акустических установках.

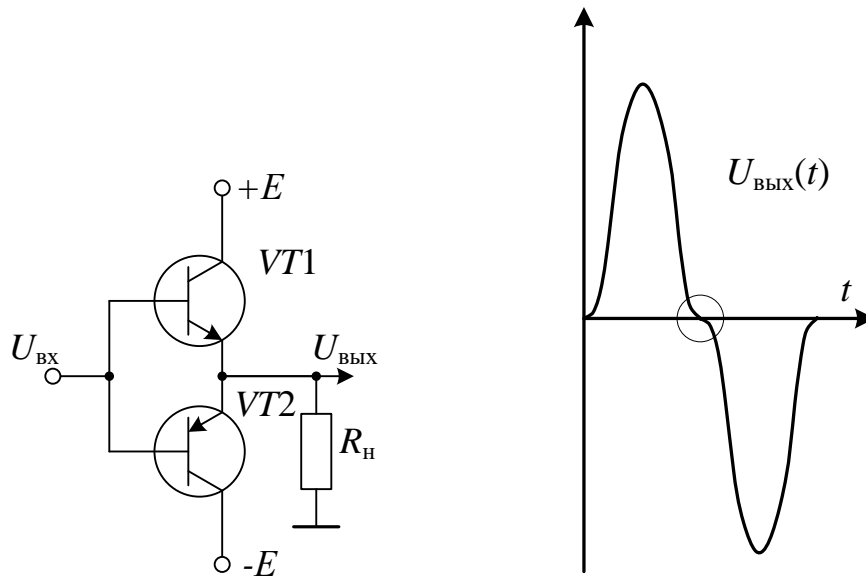


Рис. 3.10. Двухтактная схема усилителя

При отсутствии входного сигнала транзисторы закрыты и, следовательно, ток не течет, а значит и КПД усилителя получается гораздо выше (~70%), чем у класса А.

### Усилители класса АВ

Для того чтобы преодолеть искажения были созданы так называемые компромиссные устройства класса АВ. Этот усилитель представляет собой комбинацию класса А и класса В. Усилители класса АВ считаются одними из самых распространенных вариантов конструкций.

Усилитель класса АВ имеет гораздо более высокий КПД, чем класс А, но гораздо меньше искажений, чем класс В. Это достигается за счет небольшого смещения рабочей точки выше порогового значения тока, где усилители класса В имеют существенную нелинейность. На рис. 3.11 показана схема включения транзисторов для класса АВ. Смещение рабочей точки задается с помощью резисторов  $R_1$  и  $R_2$ . Типичный ток смещения составляет 50 мА.

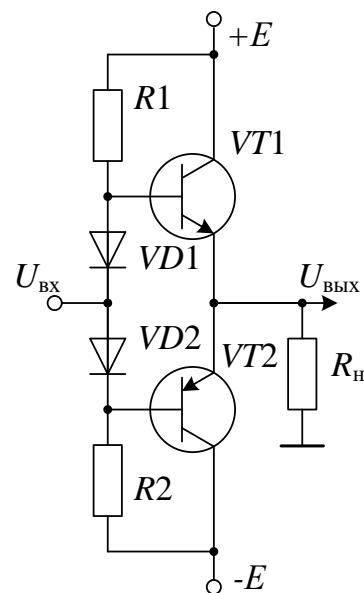


Рис. 3.11. Усилитель класса АВ

Таким образом практически исключается работа усилителя на нелинейном участке статической характеристики. На участке малых напряжений и токов (на нелинейном участке) оба транзистора в одно и то же время проводят сигнал. Затем они переходят в класс В для больших сигнальных токов. Это позволяет существенно снизить искажения. Для любой данной конструкции усилителя будет оптимальный ток смещения, который минимизирует (но не устраняет полностью) искажения.

Энергетические показатели режима АВ уступают показателям режима В, но значительно лучше, чем показатели режима А. КПД усилителя составляет ~50...70%. Большинство коммерческих усилителей мощности относятся к классу АВ.

### ***Усилители класса С***

Рабочая точка в усилителях класса С, по сравнению с классом В, еще больше смещена относительно центра линейного участка и выбирается ниже начала линейного участка статической характеристики. Из-за отрицательного смещения входной ток принимает нулевое значение и держится на этой отметке на протяжении более 1/2 периода поступающего сигнала. В это время транзистор пребывает в режиме отсечки и его ток близок к нулю.

Конструкция установок, относящихся к классу С, обладает максимальной эффективностью, но при этом довольно плохой линейностью в сравнении со всеми остальными категориями.

Подобная форма смещения транзистора обеспечивает наибольшую эффективность устройства, его КПД составляет порядка 80%, но при этом она вносит довольно значительные звуковые искажения в исходящий сигнал.

Такие конструкционные особенности делают невозможным применение усилителей в акустических системах. Как правило, эти модели нашли свою сферу использования в высокочастотных генераторах, а также отдельных вариантах радиочастотных усилителей, где импульсы тока, издаваемые на выходе, преобразуются в синусоидальные волны заданной частоты.

### ***Усилители класса D***

Режим работы транзисторного каскада, при котором в установленном режиме транзистор может находиться только в состоянии

включено (режим насыщения) или выключено (режим отсечки), называется режимом усиления класса  $D$  или ключевым режимом.

При этом ток в выходной цепи усилительного каскада может принимать только два значения:  $I_{Kmax}$  и  $I_{Kmin}$ . Поэтому КПД такого усилительного каскада близок к 100%.

Режим класса  $D$  широко используется в устройствах, основным требованием к которым является получение максимального КПД. Для реализации данного режима работы входное напряжение должно принимать значение либо меньше порогового напряжения  $U_{БЭпор}$ , либо больше  $U_{вх max}$ , соответствующего границе активного режима работы и режима насыщения.

Выходное напряжение усилителя, работающего в режиме класса  $D$ , всегда имеет форму прямоугольного импульса и усиление входного сигнала сопряжено с изменением того или иного параметра импульса, например длительности фронтов.

### *Другие классы усилителей*

Ко второй категории устройств относят более современные модели, которые считаются так называемыми переключающимися классами — это модели  $D$ ,  $E$ ,  $F$ , а также  $G$ ,  $S$ ,  $H$  и  $T$ .

Эти усилители применяют в работе широтно-импульсную модуляцию, а также цифровые схемы для непрерывного перевода сигнала между полностью выключенным и полностью включенным. Как следствие, происходит мощный выход в районе насыщения.

В усилителях  $H$ - $G$  классов, по сути, представляющих из себя класс  $AB$ , используется дополнительный источник напряжения. Напряжение питания выходного каскада меняются в зависимости от уровня сигнала. Это позволяет немного повысить КПД.

В усилителях класса  $F$  обеспечивается повышенная эффективность, их КПД составляет порядка 90%.

Усилитель класса  $S$  усилителей относят к категории нелинейного механизма переключения. По механизму своей работы они в чем-то похожи на усилители категории  $D$ . Такой усилитель производит преобразование аналоговых входящих сигналов в цифровые, многократно усиливая их. Таким образом, чтобы повысить мощность на выходе, обычно цифровой сигнал переключающего устройства либо

полностью включен, либо полностью выключен, поэтому КПД таких устройств может составлять 100%.

Ещё один вариант цифрового усилителя это усилитель класса Т. Сегодня такие модели набирают всё большую популярность из-за присутствия микросхем, позволяющих выполнять цифровую обработку поступающего сигнала, а также встроенных многоканальных усилителей 3D-звучания. Такой эффект обеспечивается конструкцией, позволяющей преобразовывать аналоговые сигналы в звуки повышенной ШИМ цифрового типа.

### *Дифференциальные усилители*

Простейшая схема дифференциального усилителя показана на рис. 3.12. Главная особенность схемы – ее симметрия. Интегральная технология позволяет получить одинаковые параметры транзисторов  $VT1$  и  $VT2$  и пары резисторов. Генератор тока  $\Gamma_i$  обеспечивает постоянство тока в общей части эмиттерной цепи, поэтому потенциал эмиттера  $U_{\text{Э}} = \text{const}$ , т.е. можно считать, что эмиттеры для переменной составляющей заземлены.

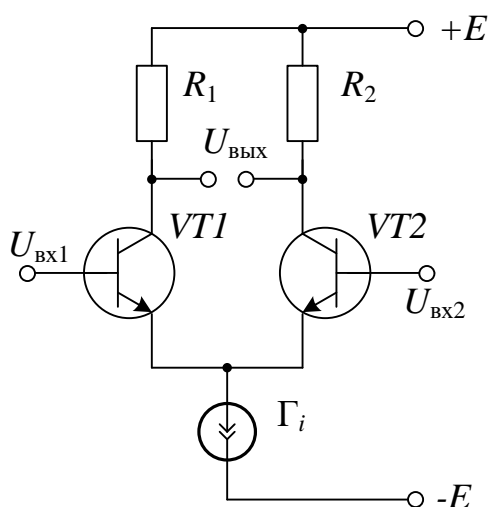


Рис. 3.12. Дифференциальный усилитель

Возможны два способа подачи входного сигнала. На рис. 3.13, *a* показан вариант синфазного подключения входного сигнала, когда приращения напряжений на входах синфазны и равны:  $\Delta U_{\text{ВХ1}} = \Delta U_{\text{ВХ2}}$ . При этом коллекторные токи транзисторов изменяются одинаково (синфазно), напряжения на коллекторах равны, а вы-



ходное напряжение:  $U_{\text{вых1}} = U_{\text{КЭ2}} - U_{\text{КЭ2}} = 0$ , т.е. синфазный сигнал дифференциальным услителем подавляется.

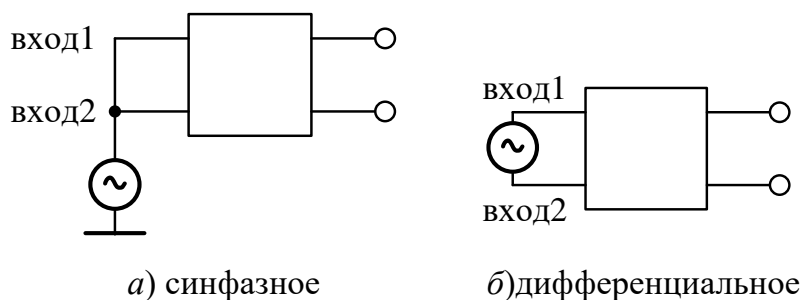


Рис. 3.13. Включение входного сигнала

На рис. 3.13, б показано дифференциальное включение входного сигнала. Сигналы на входах равны по величине и противофазны. Увеличение тока коллектора одного из транзисторов сопровождается равным по величине уменьшением тока другого транзистора. Соответственно, напряжения на коллекторах меняются противофазно, поэтому выходное напряжение равно:

$$U_{\text{вых}} = \Delta U_{\text{КЭ2}} - (-\Delta U_{\text{КЭ1}}) = 2\Delta U_{\text{КЭ}} = -KU_{\text{вх}}.$$

Здесь  $K$  – коэффициент усиления дифференциального сигнала. Таким образом, дифференциальный сигнал усиливается, а синфазный подавляется. Это весьма полезное свойство дифференциального усилителя, ибо сигнал всегда подключается дифференциально, а помехи разного рода наводятся на оба входа одинаково, т.е. оказываются подключенными синфазно и подавляются.

До появления микроэлектроники схема дифференциального усилителя была известна, но ее применение ограничивалось неидентичностью ветвей, которая сводила на нет преимущества дифференциального усилителя и вызывала дрейф нуля в измерительных приборах на основе этой схемы.

В реальных микросхемах дифференциальных усилителей сохраняется некоторая неидентичность ветвей, потому синфазный сигнал подавляется не полностью. Коэффициент подавления синфазного сигнала – это отношение коэффициентов усиления дифференциального и синфазного сигналов, выраженное в децибелах:  $K_{\text{п}} = 20 \lg \left| \frac{K}{K_{\text{с}}} \right|$

Дифференциальные усилители широко применяются в аналоговой схемотехнике, в частности, в качестве входных каскадов операционных усилителей.

### **Контрольные вопросы**

1. Как осуществляется питание усилительных каскадов?
2. Как осуществляется подача напряжения смещения?
3. Перечислите основные показатели и характеристики усилительных устройств.
4. Что называют полосой пропускания усилителя?
5. Как возникают нелинейные искажения усилителя?
6. Чем определяется режим работы усилителя?
7. Перечислите основные классы усилителей.
8. Какие классы усилителей применяются наиболее часто для усиления аналоговых сигналов?
9. Какой класс усилителя имеет наименьший коэффициент нелинейных искажений?
10. Какой класс усилителя имеет наибольший КПД?
11. Какой класс усилителя работает в ключевом режиме?
12. Поясните принцип работы двухтактного усилителя.
13. В чем основное отличие усилителя класса АВ от класса В?
14. Какое назначение дифференциального усилителя?

## 4. ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Современный этап развития электроники характеризуется тем, что при проектировании электронных средств различного назначения используют не дискретные элементы (транзисторы, диоды резисторы, конденсаторы и т.п.), а законченные функциональные узлы, выполненные в виде интегральной схемы (ИС). Такой подход позволяет значительно повысить статические, динамические, эксплуатационные и показатели аппаратуры, существенно удешевить и сократить сроки ее проектирования, которое фактически сводится к разработке структуры, удовлетворяющей поставленным требованиям, выбору необходимых ИС и согласованию их входных и выходных характеристик.

Применительно к цифровым устройствам выбор ИС с нужными свойствами достаточно форматизирован и практически не представляет труда.

В то же время выбор и применение аналоговых ИС (АИС) достаточно специфичны и оставляют большой простор для творчества разработчика. Он должен знать внутреннюю схемотехнику и конструкцию АИС, свойства типовых схем и условия их применения, а также методы быстрой оценки основных характеристик разрабатываемого устройства.

В настоящее время разработано большое число АИС как общего, так и специального назначения. К ним, в первую очередь, следует отнести АИС усилителей постоянного тока (операционных усилителей), схем сравнения (компараторов), источников питания (стабилизаторов напряжения). Большую группу составляют специализированные АИС, предназначенные для построения бытовой аппаратуры. Здесь можно выделить АИС, предназначенные для звуковоспроизводящей и радиоприемной аппаратуры. Однако, несмотря на различие используемой элементной базы, функционального назначения и технологии изготовления основой большинства из них является схемотехника дифференциального усилителя постоянного тока.

Дифференциальный усилитель в настоящее время по существу является основным схемотехническим элементом современной интегральной аналоговой электроники. Именно по этой причине интегральные усилители постоянного тока являются наиболее массовым типом АИС. Рассмотрим основные параметры, особенности построе-

ния и функционирования наиболее распространенной аналоговой ИС – операционном усилителе.

Операционный усилитель (ОУ) – унифицированный многокаскадный усилитель постоянного тока, удовлетворяющий следующим требованиям к электрическим параметрам:

- коэффициент усиления по напряжению стремится к бесконечности ( $K_U \rightarrow \infty$ );
- входное сопротивление стремится к бесконечности ( $R_{ВХ} \rightarrow \infty$ );
- выходное сопротивление стремится к нулю ( $R_{ВЫХ} \rightarrow 0$ );
- если входное напряжение равно нулю, то выходное напряжение также равно нулю ( $U_{ВХ} = 0 \rightarrow U_{ВЫХ} = 0$ );
- бесконечная полоса усиливаемых частот ( $f_B \rightarrow \infty$ ).

История названия операционного усилителя связана с тем, что подобные усилители постоянного тока использовались в аналоговой вычислительной технике для реализации различных математических операций, например суммирования, интегрирования и др. В настоящее время эти функции хотя и не утратили своего значения, однако составляют лишь малую часть списка возможных применений ОУ. Являясь, по существу, идеальным усилительным элементом, ОУ составляет основу всей аналоговой электроники, что стало возможным в результате достижений современной микроэлектроники, позволившей реализовать достаточно сложную структуру ОУ в интегральном исполнении на одном кристалле и наладить массовый выпуск подобных устройств. Все это позволяет рассматривать ОУ в качестве простейшего элемента электронных схем подобно диоду, транзистору и т.п. Следует отметить, что на практике ни одно из перечисленных выше требований к ОУ не может быть удовлетворено полностью. Достоверность допущений об идеальности свойств в каждом конкретном случае подтверждается сопоставлением реальных параметров ОУ и требований к разрабатываемым электронным средствам. Так, если требуется разработать усилитель с коэффициентом усиления 10, то стандартный ОУ с коэффициентом усиления 25000 можно рассматривать для этого случая как идеальный.

## 4.1. Структурная схема операционного усилителя

Операционный усилитель – это аналоговая интегральная схема, снабженная, как минимум, пятью выводами.

Условное графическое изображение ОУ приведено на рис. 4.1. Два вывода ОУ используются в качестве входных, один вывод является выходным, два оставшихся вывода используются для подключения источника питания ОУ. С учетом фазовых соотношений входного и выходного сигналов один из входных выводов (вход 1) называется неинвертирующим, а другой (вход 2) инвертирующим.

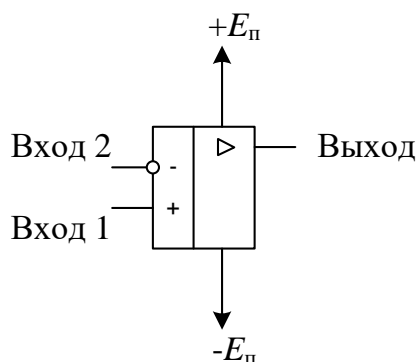


Рис. 4.1. Условное графическое изображение ОУ

Выходное напряжение связано с входными напряжениями соотношением  $U_{\text{вых}} = K_{U0}(U_{\text{вх1}} - U_{\text{вх2}})$ , где  $K_{U0}$  собственный коэффициент усиления ОУ по напряжению. Из приведенного выражения следует, что ОУ воспринимает только разность входных напряжений, называемую дифференциальным входным сигналом, и нечувствителен к любой составляющей входного напряжения, воздействующей одновременно на оба его входа (синфазный входной сигнал).

Как было отмечено ранее,  $K_{U0}$  в ОУ должен стремиться к бесконечности, однако на практике он ограничивается значением  $10^5 \dots 10^6$  или  $100 \dots 120$  дБ. В качестве источника питания ОУ используют двухполярный источник напряжения ( $+E_{\text{п}}$ ,  $-E_{\text{п}}$ ). Средний вывод этого источника, как правило, является общей шиной для входных и выходных сигналов и в большинстве случаев не подключается к ОУ. В реальных ОУ напряжение питания лежит в диапазоне  $\pm 3 \text{ В} \dots \pm 18 \text{ В}$ . Использование источника питания со средней точкой предполагает возможность изменения не только уровня, но и полярности как входного, так и выходного напряжений ОУ.

Реальные ОУ обычно снабжаются большим числом выводов, которые используются для подключения внешних цепей частотной коррекции, формирующих требуемый вид ЛАЧХ усилителя.

Реализация перечисленных выше требований к электрическим параметрам ОУ невозможна на основе схемы однокаскадного усилителя. Поэтому реальные ОУ строятся на основе двух- или трех-каскадных усилителей постоянного тока. Структурная схема трехкаскадного ОУ приведена на рис. 4.2.



Рис. 4.2. Структурная схема трехкаскадного ОУ

Она включает в себя входной, согласующий и выходной каскады усилителя. Анализ электрических параметров ОУ показывает, что их практическая реализация предполагает использование в качестве входного каскада ОУ дифференциального усилительного каскада, что позволяет максимально уменьшить величину дрейфа усилителя, получить достаточно высокое усиление, обеспечить получение максимально высокого входного сопротивления и максимально подавить действующие на входе синфазные составляющие, обусловленные изменением температуры окружающей среды, изменением напряжения питания, старением элементов и т.п.

Согласующий каскад служит для согласования выходного сигнала дифференциального усилителя с выходным каскадом ОУ, обеспечивая необходимое усиление сигнала по току и напряжению, а также согласование фаз сигналов.

Выходной каскад, который, как правило, выполняется по двухтактной схеме, обеспечивает требуемое усиление сигнала по мощности.

Более простой является двухкаскадный ОУ, из которой исключен согласующий каскад (рис. 4.3). Необходимый  $K_{U0}$  обеспечивается как входным дифференциальным, так и выходным каскадами. Практическая реализация такого решения наталкивается на трудности, связанные с тем, что входное сопротивление дифференциального каскада обратно пропорционально суммарному эмиттерному току его

транзисторов, в то время как значение  $K_{U0}$  прямо пропорционально этому току.

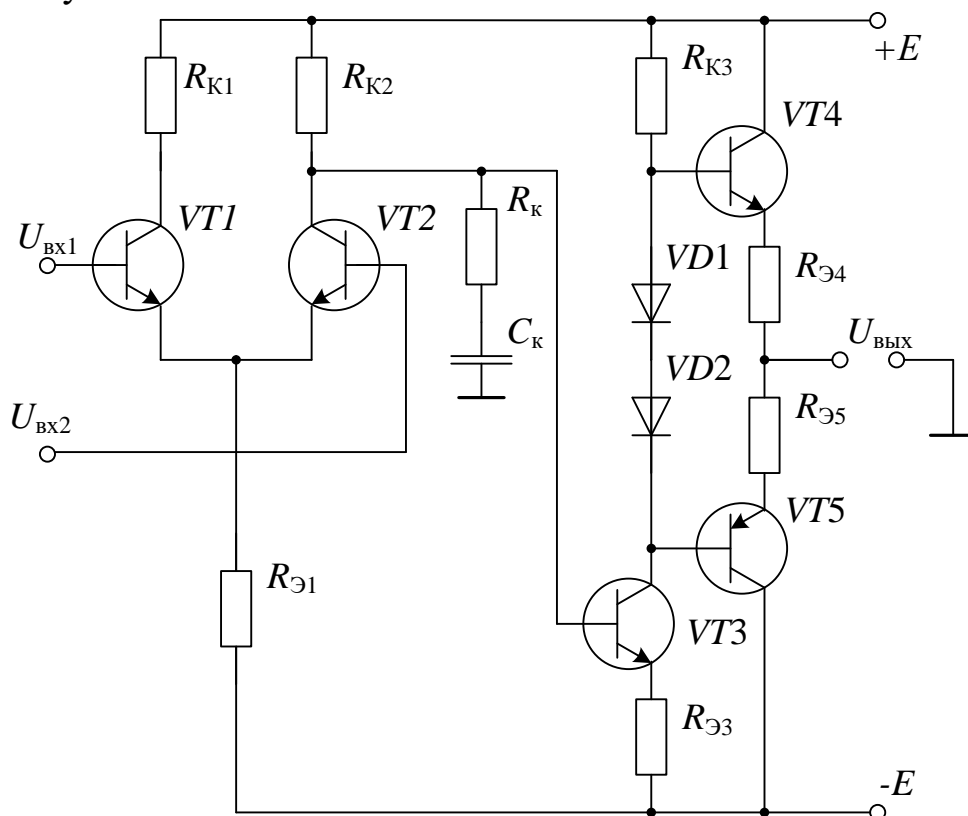


Рис. 4.3. Упрощенная схема двухкаскадного ОУ

Поэтому попытка повысить усиление дифференциального каскада приводит к снижениям входного сопротивления усилителя. Разрешению этого противоречия способствует использование в первом каскаде схемы активной нагрузки. Такое схемотехническое решение стало возможным после освоения технологии изготовления на общей подложке ИС биполярных транзисторов различного типа проводимости с идентичными характеристиками. Примером такого усилителя является двухкаскадный ОУ типа К544УД1.

Входной каскад усилителя выполнен по дифференциальной схеме на *n*-канальных полевых транзисторах с управляющим *p-n* переходом. Выходной каскад образуют усилитель на транзисторе, включенном по схеме с ОЭ и охваченном цепью последовательной ООС по току нагрузки и двухтактный усилитель мощности на комплементарных транзисторах.

## 4.2. Основные параметры операционного усилителя

Основные параметры ОУ характеризуют его работу.

*Коэффициент усиления по напряжению*  $K_{U0}$  характеризует способность ОУ усиливать подаваемый на его входы дифференциальный сигнал  $K_{U0} = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta U_{\text{вх}}}$ . Типовое значение коэффициента усиления ОУ составляет до  $10^5 \dots 10^6$  или 100...120 дБ.

*Входное напряжение смещения* – это напряжение, которое обусловлено, в основном, неидентичностью напряжений эмиттерных переходов транзисторов входного дифференциального усилителя. Наличие этого напряжения приводит к нарушению условия, согласно которому  $U_{\text{вых}} = 0$  при  $U_{\text{вх}} = 0$ . Численно входное напряжение смещения определяется как напряжение, которое необходимо приложить к входу усилителя для того, чтобы его выходное напряжение было равно нулю. Иногда это напряжение называют напряжением сдвига нуля  $U_{\text{см}}$ . Типовое значение этого напряжения единицы – десятки милливольт.

*Входной ток* (входной ток смещения) – ток, протекающий во входных выводах ОУ и необходимый для обеспечения требуемого режима работы его транзисторов по постоянному току. Типовое значение этого тока единицы микроампер – сотни наноампер.

*Разность входных токов*  $\Delta I_{\text{вх}}$  (ток сдвига). Этот ток возникает, в основном, при неодинаковых коэффициентах передачи тока  $\beta$  ( $h_{21Э}$ ) транзисторов входного каскада ОУ. Численно он равен модулю разности входных токов усилителя  $\Delta I_{\text{вх}} = |I_{\text{вх1}} - I_{\text{вх2}}|$ . Типовое значение параметра  $\beta$  от единиц микроампер до единиц и десятых долей наноампера.

*Входное сопротивление*  $R_{\text{вх}}$ . Различают дифференциальное входное сопротивление  $R_{\text{вх диф}}$  и синфазное входное сопротивление  $R_{\text{вх син}}$ .  $R_{\text{вх син}} \cdot R_{\text{вх диф}}$  определяется как сопротивление между входами усилителя, а  $R_{\text{вх син}}$  как сопротивление между объединенными входными выводами и нулевой шиной. Повышение входного сопротивления дифференциального усилителя достигается снижением базовых токов покоя транзисторов входного дифференциального каскада. до очень малых значений (единицы наноампер), но это ухудшает работу дифференциального усилителя из-за уменьшения его динамического диа-



пазона, под которым понимают выраженное в децибелах отношение максимального сигнала к минимальному.

Для предотвращения этого фактора в качестве транзисторов применяют транзисторы с очень большими коэффициентами усиления по току (единицы тысяч) за счет использования в них предельно тонкой базы. Однако применение таких транзисторов заметно усложняет задачу стабилизации дифференциального усилителя. Поэтому в ряде случаев повышение входного сопротивления ОУ достигается использованием в его входном канале полевых транзисторов. Типовое значение входного сопротивления – сотни килоом.

*Выходное сопротивление*  $R_{\text{вых}}$  – это сопротивление усилителя, рассматриваемого как эквивалентный генератор. Типовое значение выходного сопротивления сотни Ом.

*Коэффициент подавления синфазного сигнала*  $K_{\text{псф}}$  определяет степень подавления (ослабления) синфазной составляющей входного сигнала. Его типовое значение – 50 ... 70 дБ.

*Максимальная скорость изменения выходного напряжения*  $V$  характеризует частотные свойства усилителя при его работе в импульсных схемах; измеряется при подаче на вход ОУ напряжения ступенчатой формы, Типовое значение скорости изменения выходного напряжения – единицы вольт/микросекунд.

*Частота единичного усиления*  $F_{\text{max}}$  – это частота, на которой модуль коэффициента усиления ОУ равен единице. Обычно эта частота не превышает нескольких мегагерц.

Кроме перечисленных обычно задаются и предельно допустимые значения основных эксплуатационных параметров:

- максимально допустимое напряжение питания;
- максимально допустимый выходной ток;
- диапазон рабочих температур;
- максимально допустимая рассеиваемая мощность;
- максимально допустимое входное синфазное напряжение;
- максимально допустимое входное дифференциальное напряжение и др.

Большинство перечисленных параметров сильно зависит от условий эксплуатации. Эти зависимости обычно задаются графически.

### 4.3. Частотные свойства операционного усилителя

Частотные свойства ОУ и зависимости от условий его применения характеризуются двумя группами параметров. К первой группе относятся параметры, используемые при построении аналоговых схем. К ним в первую очередь относятся передаточная функция усилителя и соответствующие ей ЛАЧХ и ФЧХ. Вторая группа параметров, а именно максимальная скорость изменения выходного сигнала (скорость отклика усилителя), характеризующегося временем установления выходного напряжения и временем восстановления после перегрузки, применяется для характеристики работы ОУ в импульсных схемах.

При рассмотрении частотных свойств ОУ необходимо принимать во внимание следующее: ОУ может как содержать, так и не содержать собственные (внутренние) цепи коррекции; ОУ является многокаскадным усилителем, поэтому его амплитудная и фазовая частотные характеристики могут быть получены простым суммированием соответствующих характеристик входящих в него каскадов.

На рис. 4.4 приведена ЛАЧХ трехкаскадного ОУ.  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  и  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  – и коэффициенты усиления и постоянные времени соответственно первого, второго и третьего каскадов ОУ.  $K_{\Sigma}$  – суммарный коэффициент усиления ОУ.

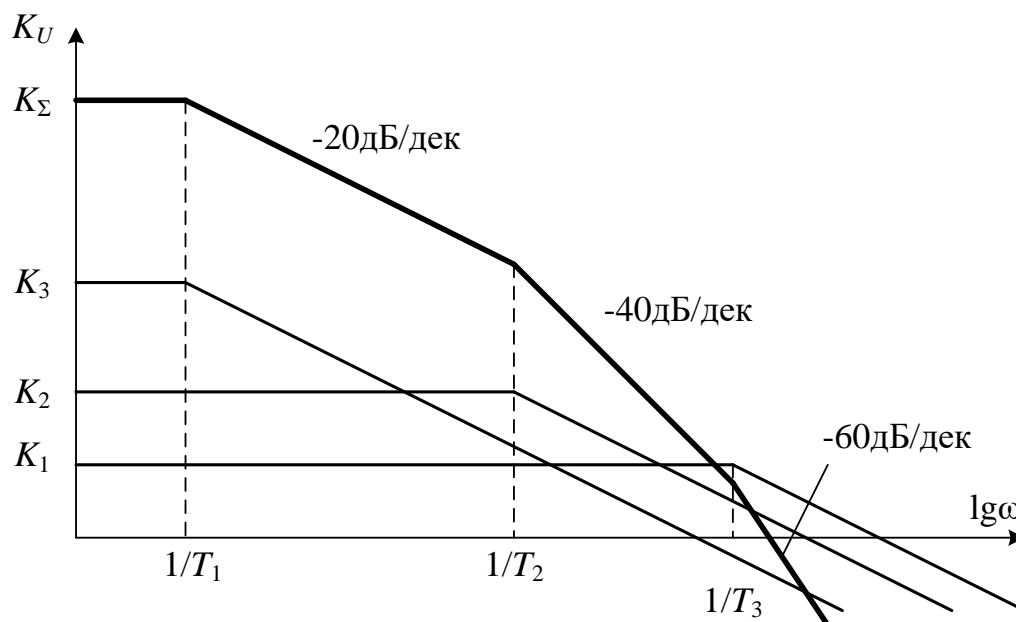


Рис. 4.4. ЛАЧХ трехкаскадного операционного усилителя

#### 4.4. Классификация операционных усилителей

*Быстродействующие широкополосные операционные усилители* используются для преобразования быстроизменяющихся сигналов. Они характеризуются высокой скоростью нарастания выходного сигнала, малым временем установления, высокой частотой единичного усиления, а по остальным параметрам уступают операционным усилителям общего применения. Их основные параметры: скорость нарастания выходного сигнала  $V_{U\max} \geq 30$  В/мкс; время установления  $t_{уст} \geq 1$  мкс; частота единичного усиления  $f_1 \geq 10$  МГц.

Таблица 4.1. Параметры быстродействующих широкополосных ОУ

Тип ОУ	$f_1$ , МГц	$V_{Uвых}$ , В/мкс	$t_{уст}$ , мкс	$I_{вых\max}$ , мА	$R_{н\min}$ , кОм	$I_{пот}$ , мА	$U_{см}$ , мВ
К140УД10	15	30	1	-	2	10	4
К140УД11	15	30	-	8	2	8	5
К140УД23	10	30	0,5	-	2	10	10
К154УД2	15	150	5	-	2	6	2
К154УД3	15	80	0,5	5	2	9	9
К154УД4	30	400	0,6	2	2	6	5
К574УД1	10	50	-	5	2	8	50

*Прецизионные (высокоточные операционные усилители)* используются для усиления малых электрических сигналов, сопровождаемых высоким уровнем помех, и характеризуются малым значением напряжения смещения и его температурным дрейфом, большими коэффициентами усиления и подавления синфазного сигнала, большим входным сопротивлением и низким уровнем шумов. Как правило, имеют невысокое быстродействие.

Их основные параметры: напряжение смещения  $U_{см} \leq 250$  мкВ; температурный дрейф  $\Delta U_{см} / \Delta T \leq 5$  мкВ/°С; коэффициент усиления  $K_U \geq 150$  тыс.

Таблица 4.2 Параметры прецизионных ОУ

Тип ОУ	$U_{см}$ , мкВ	$\Delta U_{см}/\Delta T$ , мкВ/°С	$K_{U0}$ , тыс	$I_{вх}$ , мА	$f_1$ , МГц	$V_{U_{ВЫХ}}$ , В/мкс
К140УД17	75	3,0	200	2,5	4	0,4
К140УД21	70	0,5	1000	1,1	1,0	1,5
К140УД24	5	0,05	1000	0,01	0,8	2,0
К140УД25	30	0,6	1000	40	3,0	1,7
К140УД26	30	0,6	1000	40	20	11

*Операционные усилители общего применения* используются для построения узлов аппаратуры, имеющих суммарную приведенную погрешность на уровне 1%. Характеризуются относительно малой стоимостью и средним уровнем параметров (напряжение смещения  $U_{см}$  единицы милливольт, температурный дрейф – десятки микро-вольт/°С, коэффициент усиления десятки тысяч, скорость нарастания от десятых долей до единиц вольт/микросекунду).

Таблица 4.3. Параметры ОУ общего применения

Тип ОУ	$U_{см}$ , мкВ	$\Delta U_{см}/\Delta T$ , мкВ/°С	$K_{U0}$ , тыс	$I_{вх}$ , мА	$f_1$ , МГц	$V_{U_{ВЫХ}}$ , В/мкс
1	2	3	4	5	6	7
К140УД1	7	20	8	7000	8	0,4
К140УД2	5	2	35	700	1	0,2
К140УД5	5	6	2,5	1100	14	6
К140УД6	5	20	60	33	1	2,5
К140УД7	4,5	50	45	220	0,8	0,3
К140УД8	20	50	50	0,2	1	10
К140УД9	5	20	35	350	1	0,5
К140УД18	10	-	50	1,0	1	2
К140УД22	10	20	50	0,2	5	7,5
К153УД1	5	20	20	600	1	0,06
К153УД2	5	20	50	500	1	0,5
К153УД3	2	15	25	200	1	0,2
К153УД5	2	10	125	100	0,3	0,005
К153УД6	2	15	50	75	0,7	0,5

Окончание таблицы 4.3

1	2	3	4	5	6	7
К157УД4	5	50	50	300	1	0,5
К553УД1	2	20	15	200	1	0,2
К553УД2	7,5	20	20	1500	1	0,5
К553УД3	2	10	25	200	1	0,2
К553УД5	1	-	1000	100	-	-

*Операционные усилители с малым входным током* – усилители с входным каскадом, построенным на полевых транзисторах. Входной ток  $I_{ВХ} \leq 100$  пикоампер.

Таблица 4.4 Параметры ОУ с малыми входными токами

Тип ОУ	$I_{ВХ}$ , нА	$U_{СМ}$ , мВ	$\Delta U_{СМ}/\Delta T$ , мкВ/°С	$K_{U0}$ , тыс	$f_1$ , МГц	$V_{U_{ВЫХ}}$ , В/мкс
К140УД24	10	0,005	0,05	1000	0,8	2,0
К544УД1	50	15	20	100	1,0	5,0
К544УД2	100	30	50	20	15	20
К1409УД	50	15	100	20	4,5	4,5
К1423УД1	50	15	-	10	0,48	0,6
К1423УД2*	40	2	25	20	0,48	-
К1429УД1*	50	15	-	10	-	-

\* Два усилителя.

*Многоканальные операционные усилителя* имеют параметры, аналогичные усилителям общего применения или микроощным усилителям с добавлением такого параметра, как коэффициент разделения каналов. Они служат для улучшения массогабаритных показателей и снижения энергопотребления аппаратуры.

Таблица 4.5 Параметры многоканальных ОУ

Тип ОУ	$U_{СМ}$ , мВ	$\Delta U_{СМ}/\Delta T$ , мкВ/°С	$K_{U0}$ , тыс	$I_{ВХ}$ , нА	$f_1$ , МГц	$V_{U_{ВЫХ}}$ , В/мкс	Число усилителей
К140УД20	3	20	50	80	0,5	0,3	2
К157УД2	10	50	50	500	1,0	0,5	2
К157УД3	5	50	50	500	1,0	0,5	2
К551УД2	5	10	5	2000	0,8	0,03	2

Окончание таблицы 4.5

Тип ОУ	$U_{см}, мВ$	$\Delta U_{см}/\Delta T, мкВ/°C$	$K_{U0},$	$I_{вх},$	$f_1, МГц$	$V_{U_{ВЫХ}}$	Число
К574УД2	30	75	25	0,5	2,0	10	2
К1401УД2	5	30	50	150	1,5	0,35	4
К1401УД3	6	-	50	250	2,5	-	4
К1401УД4	7,5	10	30	0,5	2,5	10	4
К1407УД4	5	-	5	2000	1.0	0,5	4
1408УД2	5	2	50	200	0,55	0,3	2
К1423УД2	2	25	20	250	0,48	-	2
К1423УД3	15	-	3	-	-	-	2
К1426УД1	3	-	60	2000	6,0	5,0	2
К1427УД1	-	-	5,4	800	2,0	3,0	2
К1429УД1	15	-	-	0.05	-	-	2
К1434УД1	3	30	20	200	1,0	0,5	2

*Мощные и высоковольтные операционные усилители* – усилители с выходными каскадами, построенными на мощных высоковольтных элементах. Выходной ток  $I_{ВЫХ} \geq 100mA$ ; выходное напряжение  $U_{ВЫХ} \geq 15В$ .

Таблица 4.6 Параметры мощных ОУ

Тип ОУ	$I_{ВЫХ}, А$	$U_{ВЫХ}, В$	$U_{п}, В$	$K_{U0}, тыс$	$f_1, МГц$	$U_{см}, мВ$
К157УД1	0,3	12	15	50	0,5	5
К1040УД1	0,015	27	5...33	25	1,0	7
К1040УД2	0,5	22,5	25	1	0,3	50
К1408УД1	0,1	19	27	70	0,5	8
К1422УД1	1,0	-	15	50	4,5	5

*Микромощные операционные усилители* необходимы в случаях, когда потребляемая мощность жестко лимитирована (переносные приборы с автономным питанием, приборы, работающие в ждущем режиме). Ток потребления  $I_{пот max} \leq 1mA$ .

Таблица 4.7. Параметры микро мощных ОУ

Тип ОУ	$I_{\text{пот}}, \text{мА}$	$U_{\text{п}}, \text{В}$	$U_{\text{вых}}, \text{В}$	$U_{\text{см}}, \text{мВ}$	$K_{UO}, \text{тыс}$	$V_{U_{\text{вых}}}, \text{В/мкс}$
КН0УД12	0,03	15	10	5	50	0,01
К140УД14	0,6	15	13	2	50	0,05
К140УД28	0,3	9	6	10	25	0,6
К153УД4	0,7	6	4	5	45	0,12
К154УД1	0,12	15	10	3	150	10
К1032УД1	1,0	1,2	0,7	5	25	-
К1053УД3	3,0	5	3	7	2,5	-
К1407УД2	0,1	12	10	5	50	0,01
К1407УД3	0,8	6	3	5	10	5,0
К1407УД4	0,7	1,5	0,55	5	2	1,0

### Контрольные вопросы

1. Что называется операционным усилителем?
2. Какие основные требования предъявляются к ОУ?
3. По какой схеме строятся ОУ?
4. От каких параметров зависит выходное напряжение?
5. По какой схеме выполняются входные и выходные каскады ОУ?
6. Перечислите основные параметры ОУ, характеризуют его работу.
7. Назовите предельно допустимые параметры ОУ.
8. Какой вид имеет ЛАЧХ стандартного ОУ?
9. Зачем во входном каскаде ОУ используют дифференциальный усилитель?
10. Какой параметр определяет быстродействие ОУ?
11. Какие существуют разновидности ОУ?
12. В чем принципиальное отличие микро мощных ОУ?
13. На каких элементах строится входной каскад ОУ с малым входным током?
14. В чем особенность мощных и высоковольтных ОУ?
15. Как соотносятся максимальное выходное напряжение и его напряжение питания?
16. Что такое частота единичного усиления ОУ?

## 5. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ АНАЛОГОВЫХ СИГНАЛОВ НА ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЯХ

В настоящее время ОУ находят широкое применение при разработке различных аналоговых и импульсных электронных устройств. Объясняется это тем, что, введя в цепи прямой и обратной передачи его сигналов различные линейные и нелинейные цепи, можно направленно синтезировать узлы с требуемым алгоритмом преобразования входного сигнала.

Рассмотрим типовые устройства, которые могут быть построены с использованием ОУ.

Далее будем пользоваться следующими обозначениями:

$U_{\text{ВХ И}}$  – входное напряжение на неинвертирующем входе ОУ;

$U_{\text{ВХ Н}}$  – входное напряжение на инвертирующем входе ОУ;

$U_{\text{ВЫХ}}$  – выходное напряжение ОУ;

$K_{U0}$  – коэффициент усиления ОУ на постоянном токе.

### 5.1. Повторитель напряжения

Схема повторителя напряжения, построенная на основе ОУ, приведена на рис. 5.1. Это усилитель, охваченный цепью последовательной ООС по выходному напряжению с коэффициентом передачи  $k_{\text{ОС}} = 1$ , т. е. 100%-ной ООС. Выходное напряжение этой схемы равно входному напряжению.

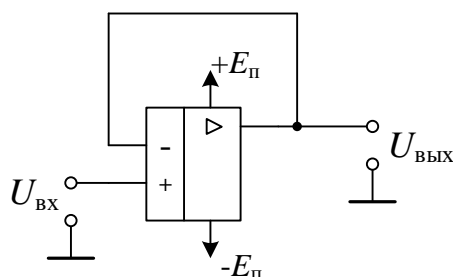


Рис. 5.1. Схема повторителя напряжения

Учитывая, что собственное входное сопротивление ОУ  $R_{\text{ВХ0}}$  стремится к бесконечности, а выходное сопротивление  $R_{\text{ВЫХ0}}$  стремится к нулю, можно сказать, что рассмотренная схема подобно эмиттерному или истоковому повторителю находит практическое применение в качестве буферных или согласующих элементов. Схема использует



ся для буферизации сигналов. Как правило, повторитель используется для управления низкоомной нагрузкой, буферизации сигналов аналого-цифровых преобразователей (АЦП) и источников опорного напряжения (ИОН).

Необходимо сделать следующие замечания:

- следует работать в линейном рабочем диапазоне напряжений ОУ;
- при работе с малыми сигналами полоса пропускания ОУ определяется шириной полосы единичного усиления;
- следует учитывать ограничения скорости нарастания выходного сигнала ОУ, чтобы минимизировать вносимые искажения;
- синфазное напряжение данной схемы равно входному напряжению;
- емкостная нагрузка на выходе ОУ не должна превышать рекомендуемое значение, указанное в документации;
- при работе с низкоомной нагрузкой может потребоваться ОУ с большим выходным током.

## 5.2. Неинвертирующий усилитель

Схема повторителя, не инвертирует входной сигнал. Вследствие единичной ООС ее коэффициент передачи равняется единице. Для получения коэффициента передачи, превышающего единицу необходимо обеспечить  $k_{oc} < 1$ . Для этого в цепь ООС необходимо ввести делитель напряжения. Схема выполненного таким образом усилителя приведена на рис. 5.2. Коэффициент передачи делителя в цепи ООС определяется из выражения

$$b_{oc} = \frac{R_1}{R_{oc} + R_1}.$$

Тогда коэффициент передачи усилителя будет равен

$$k_{U_{оос}} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{k_{U0}}{1 + k_{U0}b_{oc}}.$$

С учетом  $k_{U0} \rightarrow \infty$  окончательно получим  $k_{U_{оос}} = 1 + \frac{R_{oc}}{R_1} = \frac{1}{b_{oc}}$

Выходное напряжение неинвертирующего усилителя определяется по формуле:

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}} \left( 1 + \frac{R_{\text{оос}}}{R_1} \right). \quad (1)$$

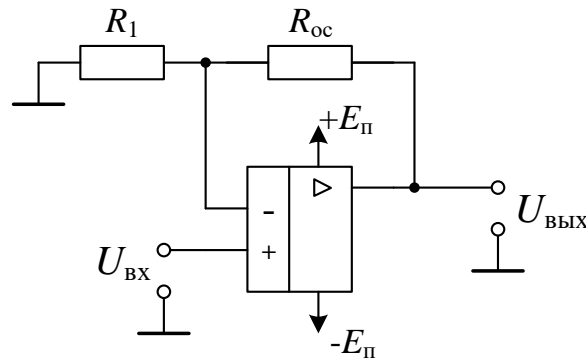


Рис. 5.2. Неинвертирующий усилитель

Из полученного выражения можно сделать следующие выводы:

- коэффициент передачи неинвертирующего усилителя обратно пропорционален коэффициенту передачи цепи ООС;
- при любых сопротивлениях резисторов в цепи ООС коэффициент передачи неинвертирующего усилителя не может быть меньше единицы.

Последний вывод непосредственно вытекает из свойств ОУ. Действительно, для уменьшения коэффициента передачи в рассматриваемой схеме необходимо увеличить коэффициент передачи цепи ООС. Пределом такого увеличения является  $b_{\text{оос}} = 1$ . Однако в этом случае схема неинвертирующего усилителя превращается в схему повторителя напряжения. Отсюда следует, что коэффициент передачи неинвертирующего усилителя не может быть менее 1.

Часто единицей в выражении (1) можно пренебречь и при определении коэффициента передачи использовать упрощенное выраже-

$$\text{ние } k_{U_{\text{оос}}} \approx \frac{R_{\text{оос}}}{R_1}.$$

В рассмотренном усилителе фазы входного и выходного напряжений совпадают.

### 5.3. Инвертирующий усилитель

В схемах повторителя и неинвертирующего усилителя сигнал обратной связи и входной сигнал подаются на различные входы ОУ. Для получения инвертирующего усилителя входной сигнал и сигнал

обратной связи должны подаваться на один и тот же инвертирующий вход, т. е. цепь ООС превращается из последовательной в параллельную. При этом неинвертирующий вход, как правило, соединяют с общей шиной. Типовая схема инвертирующего усилителя на ОУ приведена на рис. 5.3.

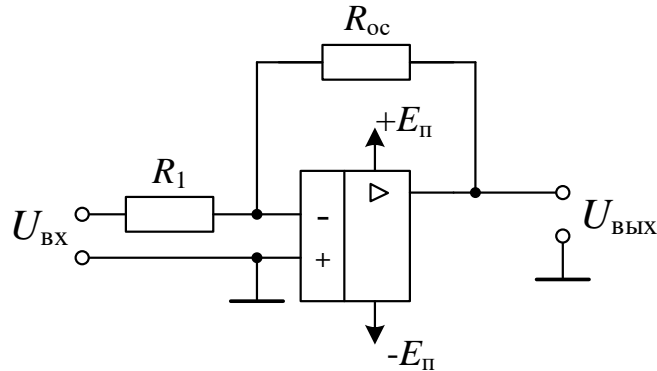


Рис. 5.3. Инвертирующий усилитель

Предполагая, что выходное сопротивление ОУ равно нулю и с учетом  $k_{U0} \rightarrow \infty$ , коэффициент передачи усилителя вычисляется по

$$\text{формуле } k_{U_{\text{ООС}}} = \frac{R_{\text{OC}}}{R_1}$$

Выходное напряжение инвертирующего усилителя определяется

$$\text{по формуле: } U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}} \left( -\frac{R_{\text{OC}}}{R_1} \right).$$

Выбором резисторов цепи ООС коэффициент передачи инвертирующего усилителя может быть уменьшен до сколь угодно малой величины. Изменение коэффициента передачи усилителя до величины, меньшей единицы, достигается за счет действия входного делителя. Для инвертирующего усилителя фазы входного и выходного напряжений сдвинуты относительно друг друга на  $180^\circ$ .

Входное сопротивление усилителя практически равно сопротивлению резистора  $R_1$ , так как непосредственно входное сопротивление усилителя  $R_{\text{ВХ ООС}}$  стремится к нулю. Данный результат объясняется действием цепи параллельной ООС, которая снижает входное сопротивление усилителя.

Пример передаточной характеристики инвертирующего усилителя изображена на рисунке 5.4, а. Как видно из графика коэффициент усиления по напряжению  $K_{U0} = -2$ .

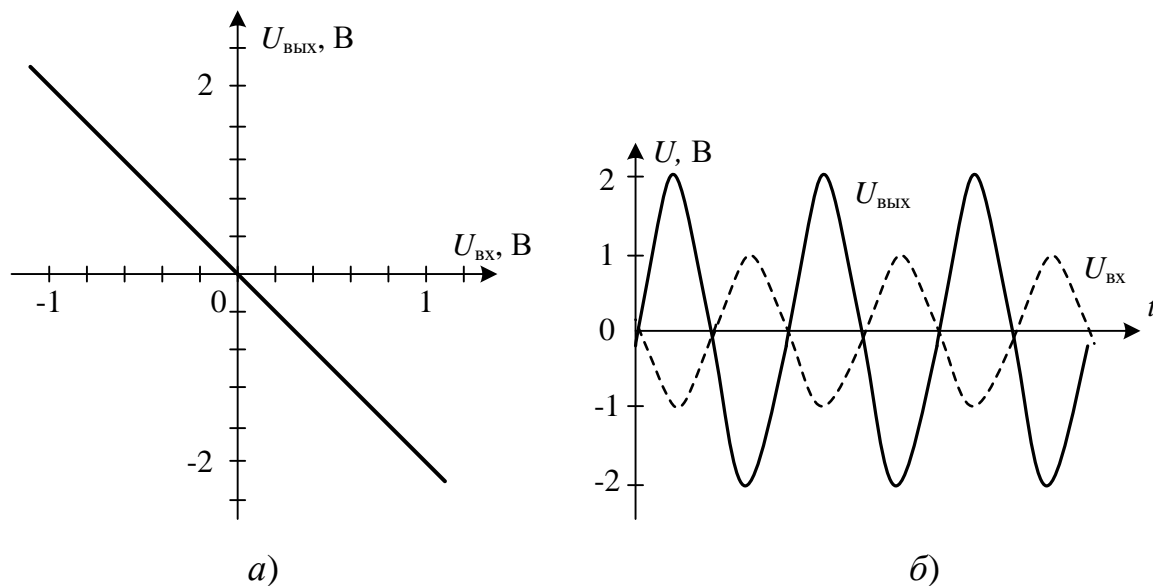


Рис. 5.4. Зависимость выходного напряжения ОУ от входного

При подаче на вход усилителя переменного напряжения  $U_{ВХ}$  выходной сигнал инвертирован относительно входного, и имеет удвоенное значение амплитуды (рис. 5.4, б).

Параметры реального ОУ не полностью соответствуют требуемым параметрам идеального ОУ (табл. 4.1 – 4.7). Входное сопротивление реального ОУ не равно бесконечности. Поэтому для нормального функционирования ОУ в его входных цепях протекает вполне определенный ток  $I_{ВХ}$ .

Наличие входных токов нарушает условия для коэффициентов передачи инвертирующего и неинвертирующего усилителя. На входе усилителя также присутствует напряжение смещения, что приводит к появлению не нулевого выходного напряжения даже при нулевом входном напряжении. Даже при нулевом напряжении смещения наличие входного тока приводит к появлению некоторого входного напряжения, и как результат – не нулевое выходное напряжение.

Для устранения этой погрешности в схему усилителя вводят внешние цепи компенсации. На рис. 5.5 показана схема инвертирующего усилителя с цепью компенсации напряжения смещения.

В цепь неинвертирующего входа добавлен корректирующий резистор, состоящий из двух последовательно включенных резисторов  $R_2$  и  $R_3$ , т. е.  $R_{кор} = R_3 + R_2$ . На резистор  $R_3$  от потенциометра  $R_5$ , подключенного к источнику питания, через ограничительный резистор  $R_4$  задается дополнительное смещение. Величина и знак этого смещения

выбираются из условия получения нулевого выходного напряжения при нулевом сигнале на входе.

Аналогично может быть скомпенсирована ошибка и в неинвертирующем усилителе. В этом случае цепь коррекции подключается к инвертирующему входу усилителя (рис. 5.6).

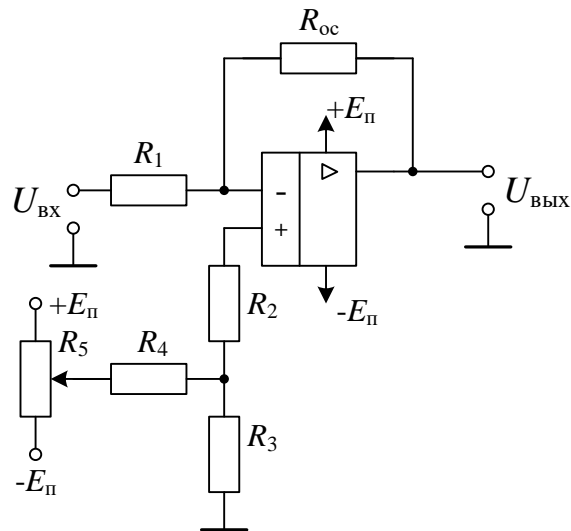


Рис. 5.5. Инвертирующий усилитель

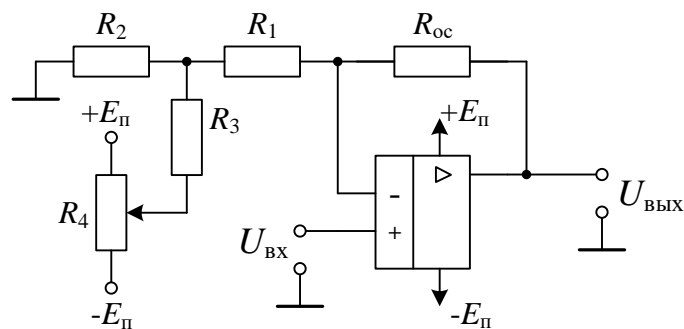


Рис. 5.6. Инвертирующий усилитель

#### 5.4. Дифференциальный усилитель

Принципиальная электрическая схема усилителя с дифференциальным входом приведена на рис. 5.7. Данная схема является комбинацией инвертирующего и неинвертирующего усилителей.

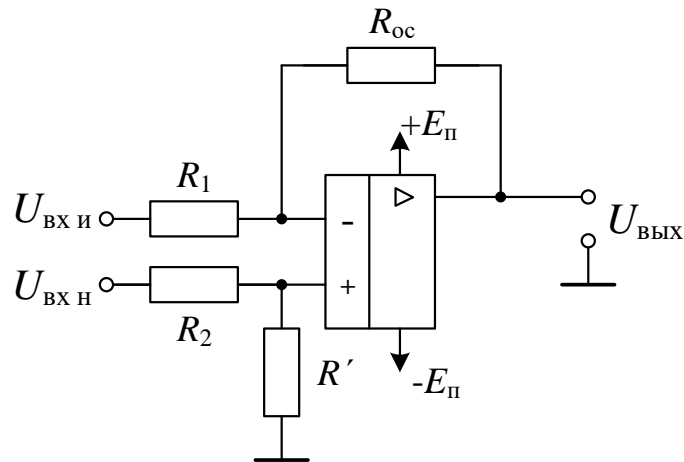


Рис. 5.7. Дифференциальный усилитель

Выходной сигнал схемы определяется разницей между входными сигналами  $U_{ВХ И}$  и  $U_{ВХ Н}$ . Коэффициент усиления соответствует коэффициенту усиления инвертирующего усилителя. Источники сигналов, как правило, должны иметь низкое сопротивление, так как входное сопротивление схемы определяется резисторами  $R_1$  и  $R_2$ .

На практике часто выполняется условие  $R_1=R_2$  и  $R_{OC}=R'$ .

Выходное напряжение определяется выражением

$$U_{ВЫХ} = (U_{ВХ Н} - U_{ВХ И}) \frac{R_{OC}}{R'}.$$

Если отношения однотипных резисторов равны, т. е.  $\frac{R'}{R_2} = \frac{R_{OC}}{R_1}$ ,

то выражения для  $U_{ВЫХ}$  также справедливо.

Следовательно, данная схема может выполнять математическую операцию вычитания двух чисел.

Дифференциальные усилители обычно используются для усиления разницы напряжений входных сигналов и исключения синфазной составляющей. Синфазное напряжение дифференциального усилителя равно общему напряжению, приложенному к обоим входам. Эффективность подавления синфазной составляющей характеризуется коэффициентом ослабления синфазного напряжения, или КОСС. КОСС дифференциального усилителя определяется точностью используемых резисторов.

## 5.5. Инвертирующий сумматор

Данное устройство предназначено для формирования напряжения, равного усиленной алгебраической сумме нескольких входных сигналов, т. е. выполняет математическую операцию суммирования нескольких сигналов. При этом выходной сигнал дополнительно инвертируется. В качестве примера на рис. 5.8 приведена схема устройства, выполняющего данную операцию для трех входных напряжений.

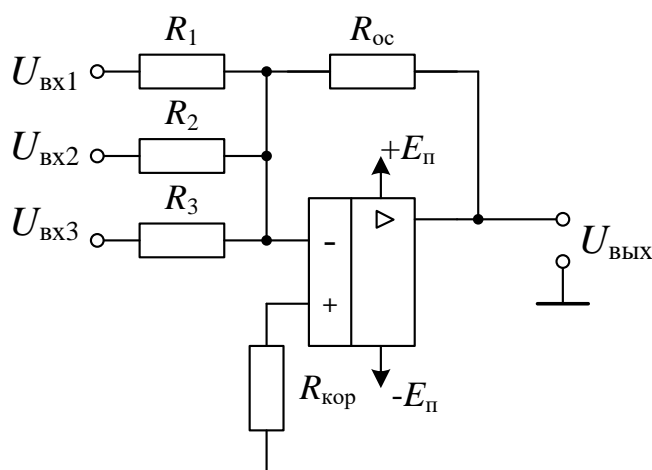


Рис. 5.8. Инвертирующий сумматор

Сигнал на выходе равен инверсии от алгебраической суммы входных сигналов, взятых со своими масштабными коэффициентами.

В частном случае, если  $R_1=R_2=R_3=R$ , то

$$U_{\text{ВЫХ}} = -(U_{\text{ВХ1}} + U_{\text{ВХ2}} + U_{\text{ВХ3}}) \frac{R_{\text{ос}}}{R}.$$

Данное выражение справедливо для любого числа входных напряжений.

Если в схеме выбрать  $R_1=R_2=\dots=R_n=R$  и  $R_{\text{ос}}=R/n$ , то

$$U_{\text{ВЫХ}} = -(U_{\text{ВХ1}} + U_{\text{ВХ2}} + \dots + U_{\text{ВХn}}) / n.$$

Следовательно, на выходе схемы будет формироваться напряжение, равное инвертированному среднему арифметическому от  $n$  входных напряжений. Поэтому такие схемы называют схемами усреднения.

Пример суммирования двух входных сигналов переменного напряжения показан на рис. 5.9. Как видно из графиков, выходной

сигнал инвертирован относительно входных. Коэффициент усиления по напряжению  $K_{U0} = -1$ .

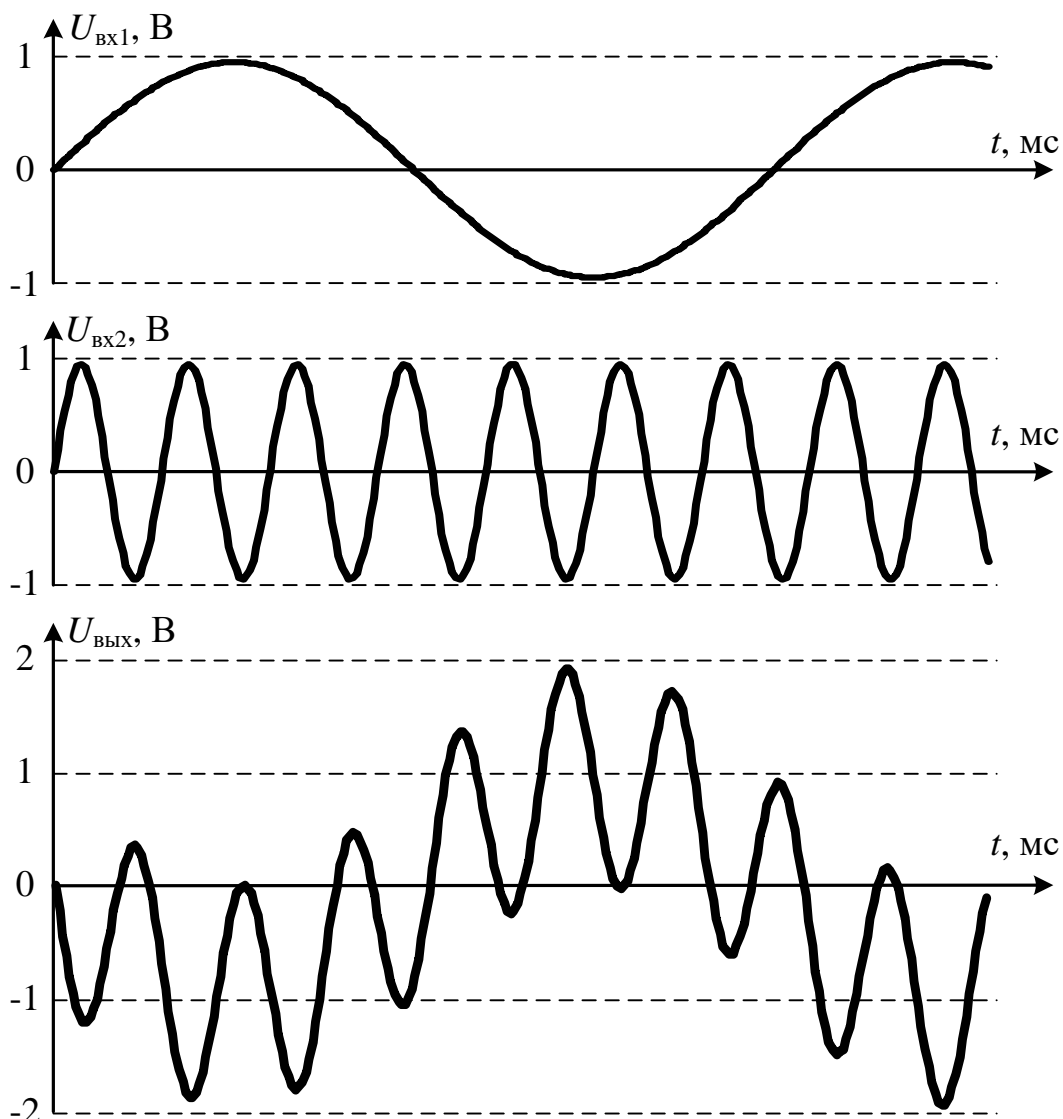


Рис. 5.9. Инвертирующий сумматор

### 5.6. Схема сложения-вычитания

В схеме на рис. 5.8 входные сигналы подавались на инвертирующий вход ОУ. Вследствие этого выходной сигнал равнялся инвертированной сумме входных напряжений.

Входное напряжение можно подавать на различные входы ОУ через соответствующие резисторы. Это позволяет получить на выходе усиленную разность входных напряжений. Схема усилителя, в которой на инвертирующий и неинвертирующий входы ОУ одновременно подается несколько напряжений, показана на рис. 5.10.



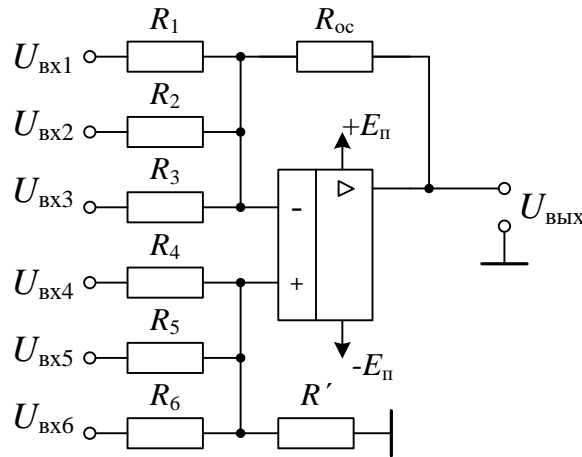


Рис. 5.10. Схема сложения—вычитания нескольких напряжений

Для получения на выходе дифференциального усилителя (рис. 5.7) сигнала равного разности входных напряжений необходимо, чтобы  $\frac{R'}{R_2} = \frac{R_{oc}}{R_1}$ .

Применительно к схеме на рис. 5.10 резисторы  $R_1$  и  $R_2$  схемы на рис.5.7 превратились в параллельное включение нескольких резисторов, в частности для инвертирующего входа  $R_1, R_2, R_3$  и неинвертирующего  $R_4, R_5, R_6$ .

Коэффициенты передачи схемы определяются выражениями:

– для инвертирующего входа  $k_{Uи} = R_{oc} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right)$ ;

– для неинвертирующего входа  $k_{Uн} = R' \left( \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6} \right)$ .

Для обеспечения работоспособности усилителя сложения – вычитания коэффициент передачи по его инвертирующему входу должен равняться коэффициенту передачи по его неинвертирующему входу, т.е.  $k_{Uи} = k_{Uн}$ .

При выполнении этого условия выходное напряжение определяется выражением

$$U_{\text{вых}} = \frac{R'}{R_4} U_{\text{вх4}} + \frac{R'}{R_5} U_{\text{вх5}} + \frac{R'}{R_6} U_{\text{вх6}} - \frac{R_{oc}}{R_1} U_{\text{вх1}} - \frac{R_{oc}}{R_2} U_{\text{вх2}} - \frac{R_{oc}}{R_3} U_{\text{вх3}}$$

На практике при разработке схем, при обеспечении требуемых коэффициентов передачи по каждому входу выходное напряжение может отличаться от расчетного. В этом случае необходимо провести

так называемую балансировку схемы. Она сводится к введению в схему дополнительного резистора, включенного между общей шиной и входом усилителя, суммарный коэффициент передачи по которому будет меньше.

### 5.7. Неинвертирующий сумматор

Данная схема может быть получена как частный случай схемы сложения – вычитания. Для этого в схеме на рис. 5.9 входные напряжения необходимо подавать только на неинвертирующий вход ОУ, что и реализовано на рис. 5.11 на примере трехвходового сумматора.

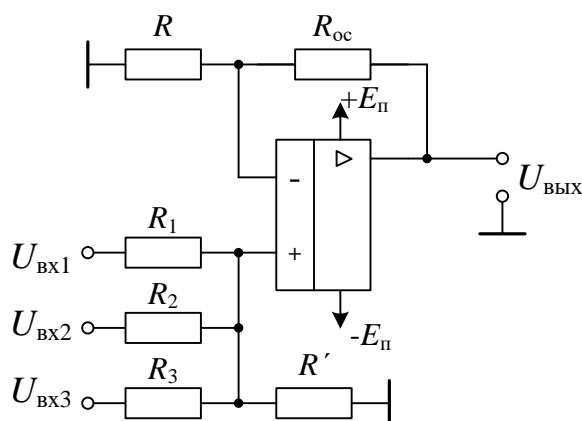


Рис. 5.11. Схема неинвертирующего сумматора

Чтобы выходное напряжение усилителя определялось выражением

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ1}} \frac{R'}{R_1} + U_{\text{ВХ2}} \frac{R'}{R_2} + U_{\text{ВХ3}} \frac{R'}{R_3}$$

должно выполняться условие

$$\frac{R_{\text{Ос}}}{R} = \frac{R'}{R_1} + \frac{R'}{R_2} + \frac{R'}{R_3}.$$

Необходимую балансировку схемы можно выполнить соответствующим подбором сопротивления резистора  $R$ .

### 5.8. Интегратор

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

Простейшая схема интегратора, выполненная на ОУ, приведена на рис. 5.12. Данная схема является инвертирующим усилителем, в

цепь обратной связи которого включен конденсатор  $C$ . Передаточная функция такого устройства записывается в виде  $W(p) = \frac{1}{RCp}$ .

Это выражение является передаточной функцией идеального интегрирующего звена с постоянной времени  $T=RC$ .

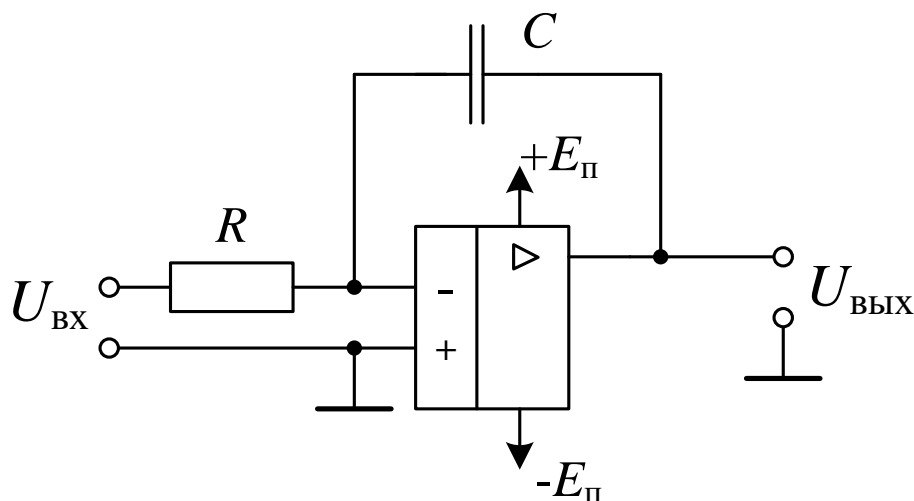


Рис. 5.12. Базовая схема интегратора

Выходное напряжение определяется выражением

$$U_{\text{ВЫХ}} = -\frac{1}{RC} \int U_{\text{ВХ}} dt .$$

Идеальная схема интегратора может насыщаться до уровня напряжения питания ( $+E_{\text{П}}$  или  $-E_{\text{П}}$  в зависимости от полярности входного напряжения смещения), по этой причине требуется дополнительный резистор обратной связи, подключаемый параллельно конденсатору  $C$ , для обеспечения стабильной рабочей точки. Резистор обратной связи определяет нижнюю границу частотного диапазона интегратора.

При подаче на вход синусоиды частотой 1 кГц на выходе наблюдается синусоида частотой 1 кГц, смещенная на  $90^\circ$ , или косинусоида (рис. 5.13).

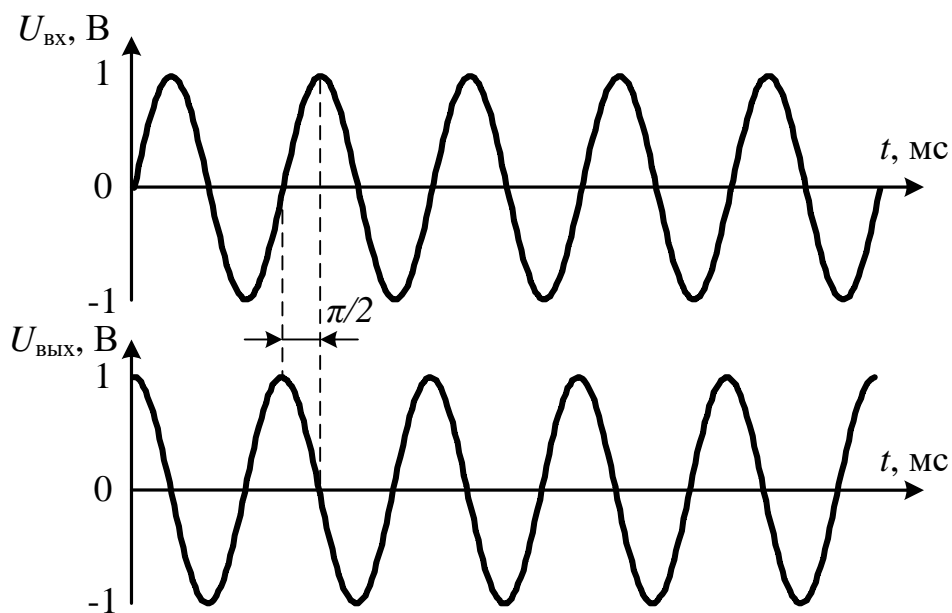


Рис. 5.13. Интегрирование синусоиды

При подаче на вход треугольного сигнала частотой 1 кГц на выходе наблюдается синусоида частотой 1 кГц (рисунок 5.14).

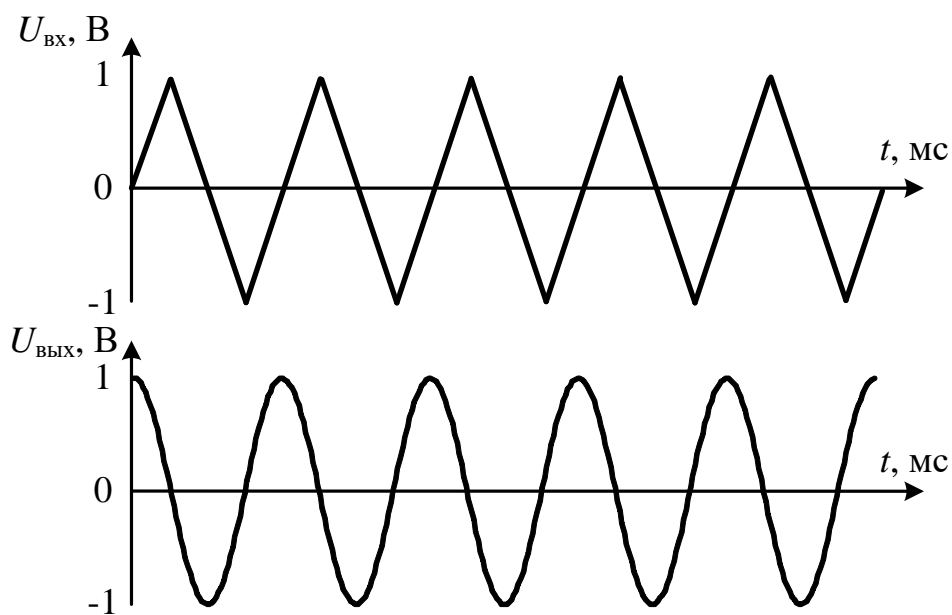


Рис. 5.14. Интегрирование треугольного сигнала

При подаче на вход прямоугольного сигнала частотой 1 кГц на выходе наблюдается треугольный сигнал частотой 1 кГц (рисунок 5.15).

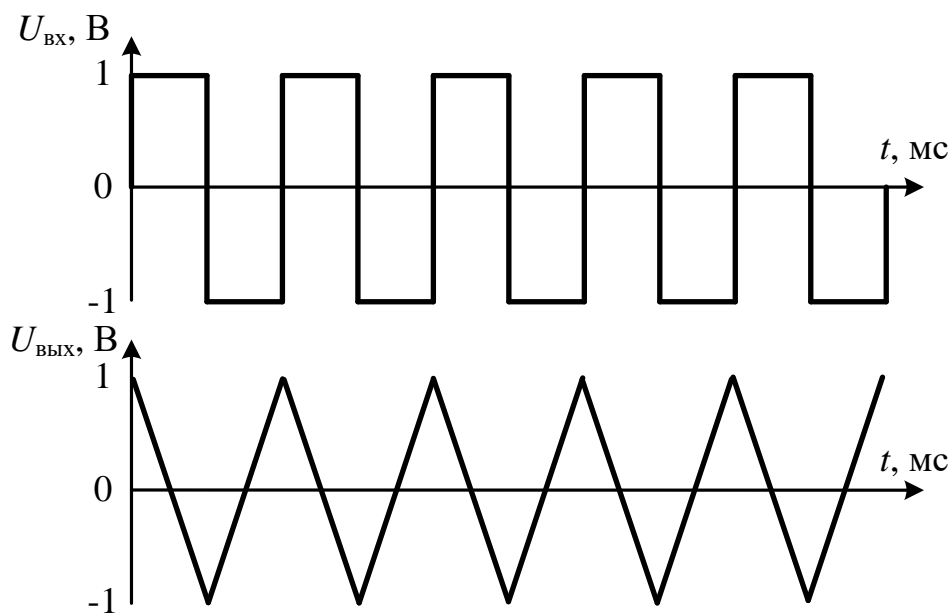


Рис. 5.15. Интегрирование прямоугольного сигнала

Следует выделить следующие основные возможности повышения точности работы интегратора:

- использование ОУ с малыми значениями  $U_{см}$ ,  $I_{вх}$  и  $\Delta I_{вх}$ ;
- применение внешних цепей компенсации  $U_{см}$ ,  $I_{вх}$  и  $\Delta I_{вх}$ ;
- ограничение максимального времени интегрирования;
- использование внешних цепей принудительного обнуления интегратора.

Схема интегратора с внешней цепью принудительного обнуления приведена на рис. 5.16.

Если транзистор VT открыт, то напряжение на конденсаторе  $U_C = 0$  и интегратор находится в исходном состоянии, так как  $U_{вых} = 0$ .

Процесс интегрирования начинается после запираания транзистора VT.

При построении различных устройств часто бывает необходимо получить выходной сигнал, равный интегралу от суммы нескольких напряжений. В этом случае можно воспользоваться схемой суммирующего интегратора.

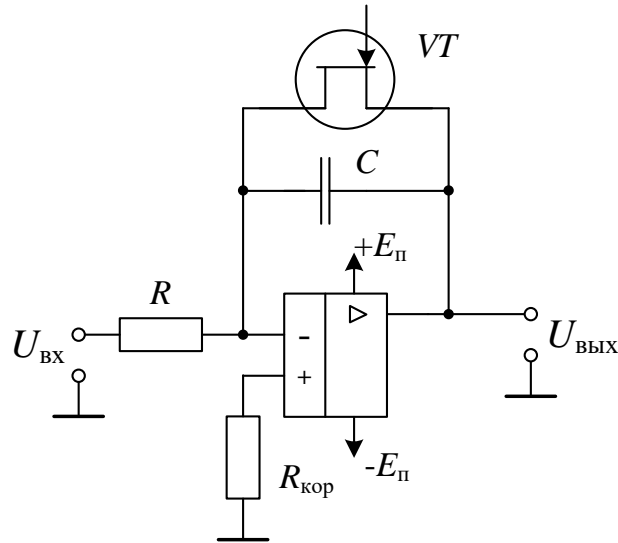


Рис. 5.16. Схема интегратора с цепью обнуления

Известны схемы, в которых выходное напряжение равно интегралу от разности входных напряжений. Эти схемы строятся на основе дифференциального усилителя.

Используя рассмотренные принципы, на основе ОУ можно строить и более сложные схемы интеграторов.

### 5.9. Дифференциатор

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 рис. 5.17. Данная схема является инвертирующим усилителем, в цепь обратной связи которого включено апериодическое RC звено. Передаточная функция такого устройства записывается в виде:

$$W_d(p) = RCp.$$

Передаточная функция соответствует идеальному дифференцирующему звену.

Однако на практике получить такую передаточную функцию, как правило, не удастся. Причиной этого является ограниченность собственной полосы пропускания ОУ.

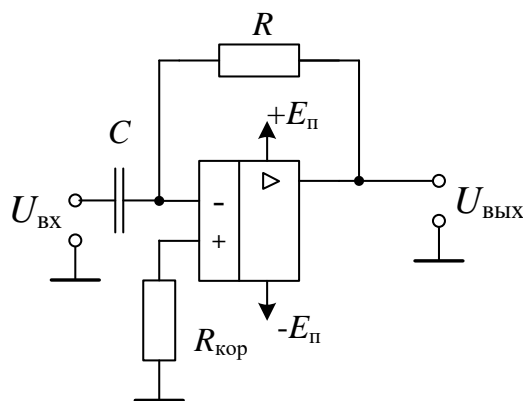


Рис. 5.17. Базовая схема дифференциатора

При подаче на вход дифференциатора синусоиды частотой 1 кГц на выходе наблюдается синусоида частотой 1 кГц, смещенная на  $90^\circ$ , или косинусоида.

При подаче на вход прямоугольного сигнала частотой 1 кГц на выходе наблюдается сигнал, характеризующий скорость изменения входного сигнала. В моменты смены знака прямоугольного сигнала на выходе появляются характерные выбросы напряжения (рисунок 5.18).

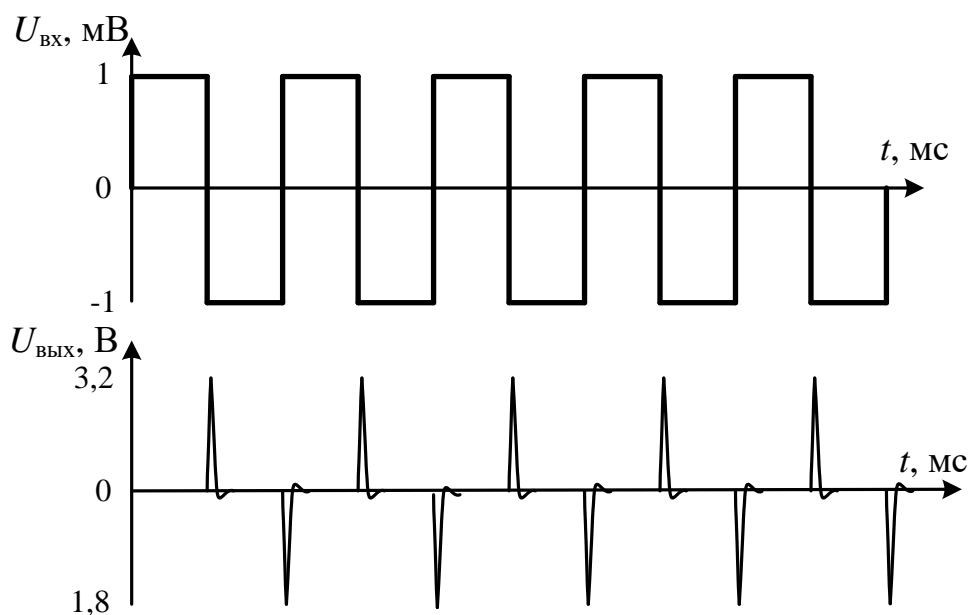


Рис. 5.18. Дифференцирование прямоугольного сигнала

Форма выходного сигнала при подаче на вход дифференциатора треугольного сигнала показана на рис. 5.19.

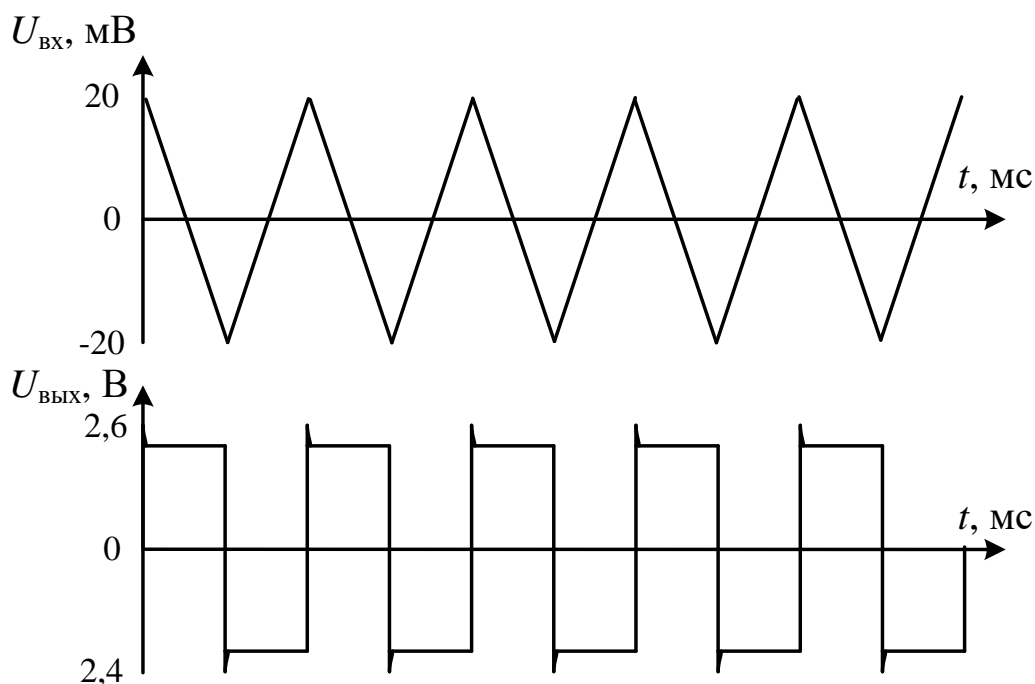


Рис. 5.19. Дифференцирование треугольного сигнала

Используя в цепях прямой и обратной связи различные дискретные элементы, такие как резисторы, конденсаторы, диоды, стабилитроны и т.д., можно построить и другие преобразователи сигналов.

К ним относятся логарифмический усилитель, выходное напряжение которого пропорционально логарифму от его входного напряжения. Экспоненциальный (антилогарифмический) усилитель выполняет обратное преобразование сигнала.

Возможно построение различных нелинейных преобразователей, например усилителей с переменным (возрастающим или убывающим) коэффициентом усиления.

Схемы ограничителей уровня напряжения, являются частным случаем нелинейных преобразователей. В этих устройствах, начиная с некоторого уровня выходного напряжения, при дальнейшем увеличении входного сигнала выходное напряжение не увеличивается.

На основе ОУ могут быть построены источники постоянного тока и источники напряжения.

Для формирования частотной характеристики заданного вида на основе усилителей строятся активные фильтры. Основным параметром фильтра является его полоса пропускания. В зависимости от полосы пропускания бывают низкой и высокой частот, полосовые и ре-



жекторные фильтры. Наиболее известными являются фильтры Чебышева, Баттерворда, Бесселя.

### 5.10. Устройства сравнения аналоговых сигналов

Устройство сравнения аналоговых сигналов (компаратор) выполняет функцию сравнения либо двух входных сигналов между собой, либо одного входного сигнала с некоторым наперед заданным эталонным уровнем. При этом на выходе устройства формируются только два значения выходного сигнала: если один из сравниваемых сигналов больше другого, то выходной сигнал равен высокому уровню, в противном случае выходной сигнал равен низкому уровню. В общем случае в качестве входных и выходных сигналов схемы сравнения могут выступать различные параметры постоянного тока. Но наиболее часто под выходными сигналами подразумевают напряжения  $U_{\text{в}}$  и  $U_{\text{н}}$ .

В общем случае выходные напряжения  $U_{\text{в}}$  и  $U_{\text{н}}$  могут отличаться как по величине, так и по знаку. Однако на практике наибольшее распространение получили устройства, формирующие на выходе либо напряжения противоположной полярности при практически равных абсолютных значениях, либо напряжения одной полярности. Первый случай характерен для использования в качестве схемы сравнения операционного усилителя (ОУ), второй – при использовании специализированных интегральных схем. Во втором случае выходные напряжения компаратора согласованы по величине и полярности с сигналами, используемыми в цифровой технике.

Поэтому можно сказать, что входной сигнал компаратора носит аналоговый характер, а выходной – цифровой. Вследствие этого компараторы часто выполняют функцию элементов связи между аналоговыми и цифровыми устройствами, т. е. выполняют функцию простейших аналого-цифровых преобразователей.

Для работы ОУ в качестве компаратора обычно усилитель охватывают цепью обратной связи.

### 5.10.1. Работа операционного усилителя при больших амплитудах входного сигнала

Рассмотрим схему инвертирующего усилителя, приведенную на рис. 5.20. В данной схеме уровень напряжения, с которым сравнивается входной сигнал, подаваемый на неинвертирующий вход, равен нулю.

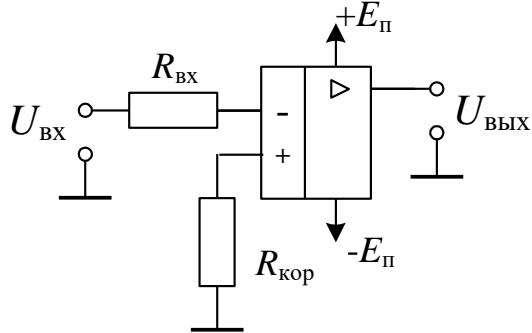


Рис. 5.20. Инвертирующий усилитель

нулю.

ОУ обладает некоторым, отличным от бесконечности, коэффициентом усиления  $K_{У0}$  и на вход усилителя подано переменное напряжение  $U_{ВХ} = U_m \sin \omega t$ , причем

амплитуда сигнала  $U_m$  больше максимального значения входного сигнала, обеспечивающего работу усилителя без ограничения выходного напряжения, т. е.  $|U_m| > \frac{|U_{ВЫХ \max}|}{K_{У0}}$ . Временные диаграммы, поясняющие работу усилителя, приведены на рис. 5.21.

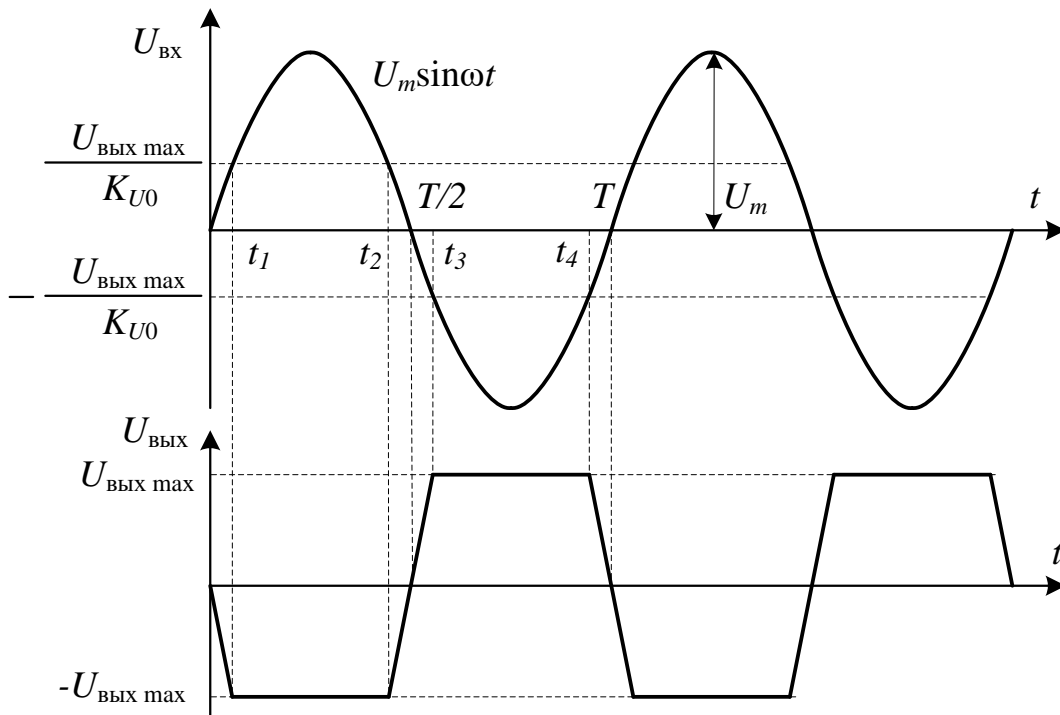


Рис. 5.21. Временная диаграмма

Очевидно, что до тех пор, пока входное напряжение будет отвечать условию  $|U_{\text{вх}} = U_m \sin \omega t| < \frac{|U_{\text{вых max}}|}{K_{U0}}$ , работа усилителя не будет отличаться от работы инвертирующего усилителя, т. е.  $U_{\text{вых}} = K_{U0} U_m \sin \omega t$ . На интервалах, когда входное напряжение превысит значение  $\frac{|U_{\text{вых max}}|}{K_{U0}}$  (интервалы  $t_1-t_2$  и  $t_3-t_4$ ), выходной сигнал ОУ будет оставаться постоянным и равным  $|U_{\text{вых}}| = U_{\text{вых max}}$ .

Нетрудно заметить, что чем больше по абсолютному значению  $U_m$ , тем меньшую часть периода будет сохраняться пропорциональность между входным и выходным напряжениями и тем дольше выходное напряжение ОУ будет равно своему максимуму.

Таким образом, при  $K_{U0} \rightarrow \infty$  и значениях  $U_m$  много больше  $E_{\text{п}}$  на выходе ОУ формируется напряжение, по форме приближающееся к прямоугольному.

При выполнении этих условий схема на рис. 5.20 часто носит название детектора нуля сигнала (нуль-детектор) или схемы определения прохождения напряжения через нуль.

### **5.10.2. Однопороговое устройство сравнения**

Однопороговыми называются устройства сравнения, для которых коэффициент усиления используемого усилителя всегда остаётся положительным. В качестве однопороговых устройств сравнения могут использоваться ОУ без цепей ОС или с положительной ОС.

Анализируя схему, приведенную на рис. 5.20, можно сказать, что ее срабатывание происходит в момент равенства нулю напряжения между инвертирующим и неинвертирующим входами ОУ. Используя данное свойство указанной схемы, можно легко построить на ее основе устройство сравнения входного напряжения с некоторым наперед заданным эталонным уровнем напряжения. Для этого достаточно неинвертирующий вход ОУ подключить к источнику эталонного напряжения (рис. 5.22). В этом случае напряжение между инвертирующим и неинвертирующим входами достигнет нулевого уровня, когда уровень, и полярность входного напряжения будут в точности равны параметрам эталонного источника  $E_{\text{эт}}$ .

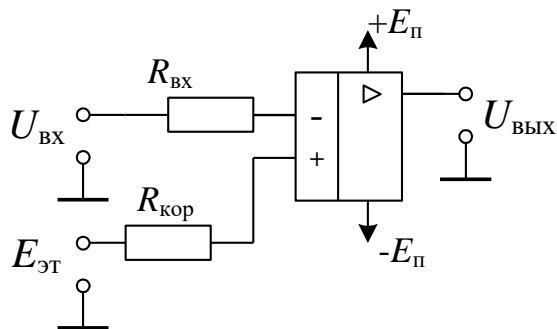


Рис. 5.22. Однопороговая схема сравнения

На рис. 5.23, в показаны передаточные характеристики схем сравнения для случаев  $E_{ЭТ} > 0$  и  $E_{ЭТ} < 0$  соответственно.

Напряжение  $E_{ЭТ}$  называют порогом срабатывания устройства сравнения.

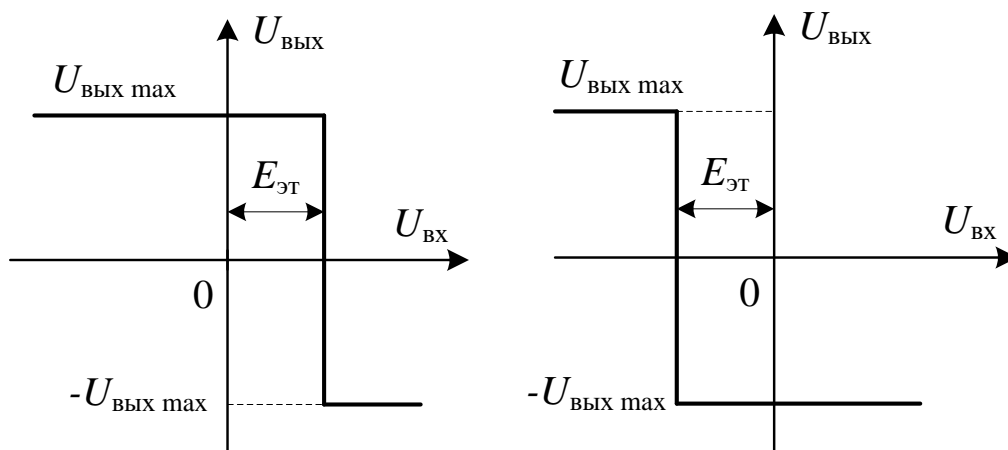


Рис. 5.23. Передаточные характеристики

Если в схеме на рис. 5.22 вместо источника эталонного напряжения использовать второе входное напряжение, ОУ превратится в схему сравнения двух напряжений. Переключение усилителя будет происходить в момент равенства входных напряжений как по абсолютному значению, так и по знаку. Схема такого устройства и временные диаграммы, поясняющие его работу, приведены на рис. 5.24.

Для подключения двух или более входных напряжений может быть использован и один инвертирующий вход ОУ, аналогично схеме инвертирующего сумматора (см. рис. 5.8). В этом случае также переключение ОУ будет происходить в момент равенства нулю напряжения между его неинвертирующим входом и суммой напряжений на инвертирующем входе.

Недостаток однопороговых компараторов: при очень медленных изменениях или малых амплитудах выходного сигнала время переключения однопорогового компаратора зависит от скорости

изменения входного сигнала, частоты единичного усиления и коэффициента усиления усилителя по напряжению.

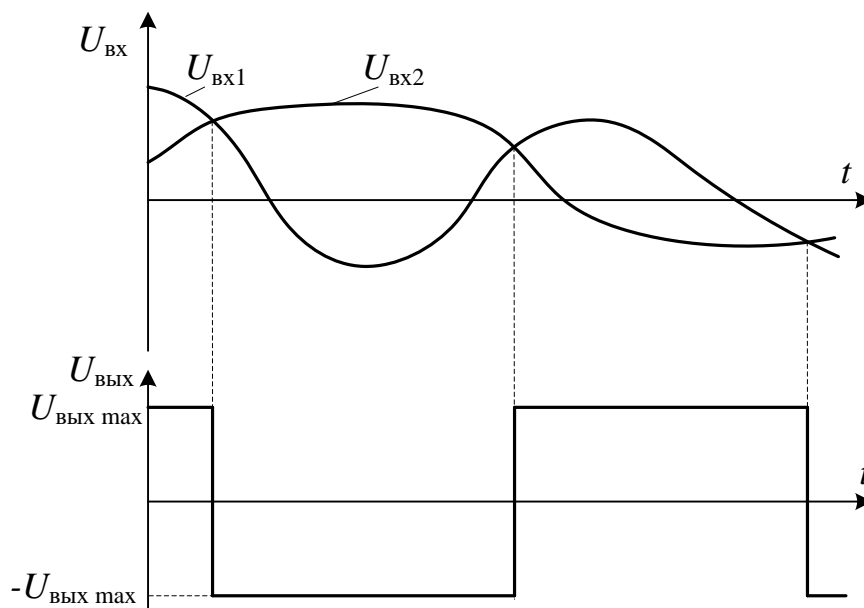


Рис. 5.24. Временная диаграмма сравнения двух сигналов

### 5.10.3. Регенеративная схема сравнения

Регенеративными (гистерезисными) называют схемы сравнения, у которых передаточная характеристика неоднозначна. Применительно к ОУ это возможно только в том случае, когда усилитель охвачен цепью положительной ОС (ПОС) с коэффициентом передачи, удовлетворяющим условию  $b_{oc} > \frac{1}{K_{U0}}$ .

На рис. 5.25 приведена передаточная характеристика ОУ для случаев  $b_{oc} < \frac{1}{K_{U0}}$ ,  $b_{oc} = \frac{1}{K_{U0}}$  и  $b_{oc} > \frac{1}{K_{U0}}$  соответственно. Очевидно, что увеличение коэффициента передачи цепи ПОС фактически приводит к повороту исходной характеристики ОУ вокруг начала координат по часовой стрелке. При этом если  $b_{oc} > \frac{1}{K_{U0}}$ , то передаточная характеристика перестает быть однозначной и появляется область входных напряжений, для которой без знания предыстории работы схемы нельзя однозначно определить значение выходного сигнала ОУ.

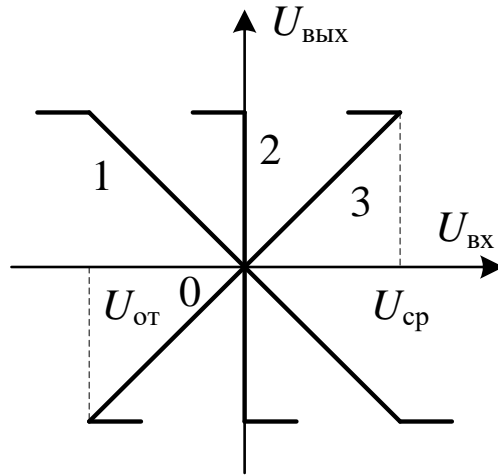


Рис. 5.25. Передаточные характеристики ОУ с цепью ПОС для случаев

$$b_{oc} < \frac{1}{K_{U0}} \quad (1), \quad b_{oc} = \frac{1}{K_{U0}} \quad (2), \quad b_{oc} > \frac{1}{K_{U0}} \quad (3)$$

Использование в схеме сравнения ОУ, у которого передаточная характеристика имеет область неоднозначного соответствия входного и выходного напряжений (имеет гистерезис), позволяет построить устройства, у которых напряжения срабатывания и отпускания не равны между собой. Принципиальная схема такого устройства сравнения и ее передаточная характеристика приведены на рис. 5.26.

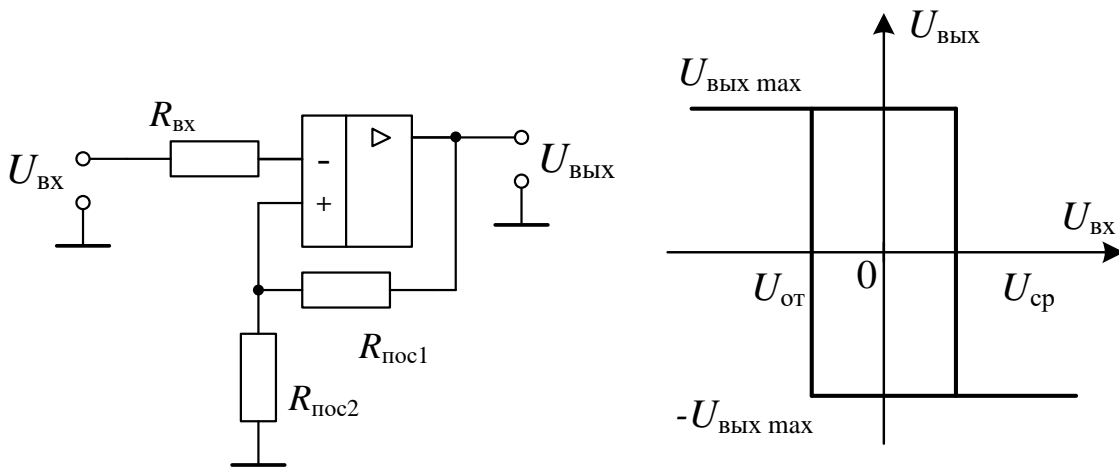


Рис. 5.26. Гистерезисная схема сравнения и ее передаточная характеристика

Напряжения срабатывания и отпускания в рассматриваемой схеме определяются следующими выражениями:

$$U_{ср} = + \frac{U_{ВЫХ \max} R_{пос2}}{(R_{пос1} + R_{пос2})}, \quad U_{от} = - \frac{U_{ВЫХ \max} R_{пос2}}{(R_{пос1} + R_{пос2})}.$$

Несимметрии передаточной характеристики схемы сравнения можно добиться, используя дополнительные источники смещения. Пример такой схемы приведен на рис. 5.27, а. Здесь источник смещения  $E_{см}$  с нулевым выходным сопротивлением подключен последовательно с резистором  $R_{пос2}$  делителя цепи ПОС. Это приводит к смещению всей характеристики на величину этого напряжения. На рис. 5.27, б показана передаточная характеристика схемы для случая использования напряжения смещения положительной полярности.

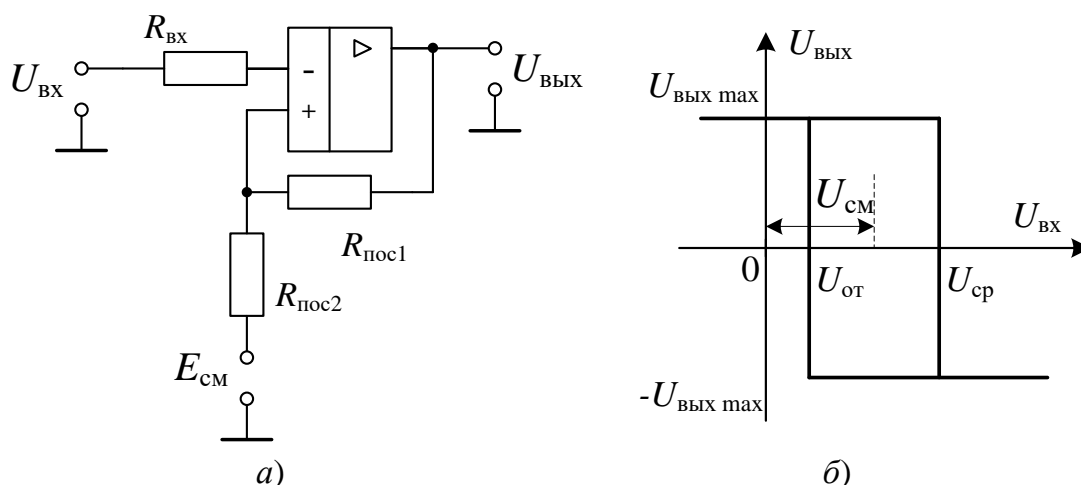


Рис. 5.27. Гистерезисная схема сравнения со смещенной характеристикой и ее передаточная характеристика

Если для подключения напряжения смещения использовать инвертирующий вход ОУ то направление смещения передаточной характеристики будет противоположно полярности напряжения источника смещения (рис. 5.28).

Анализ рассмотренных схем сравнения показывает, что с точки зрения логики построения все они повторяют различные варианты схем усилителей на ОУ. Отличием, создающим новое качество, является использование входного напряжения, уровень которого отвечает

$$\text{условию } U_{вх \max} > \frac{U_{вых \max}}{K_U}.$$

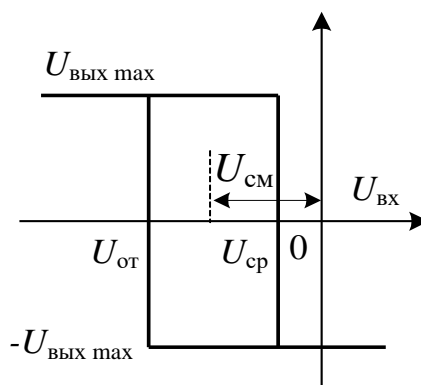


Рис. 5.28. Смещенная передаточная характеристика

Очевидно, что если  $K_U \rightarrow \infty$  (для однопороговых схем сравнения) или  $K_U < 0$  (для гистерезисных схем сравнения), амплитуда входного сигнала  $U_{\text{вх max}}$  может стремиться к нулю.

Применение гистерезисных схем сравнения позволяет в случае действия внешних помех значительно повысить надежность сравнения напряжений. Так, на рис. 5.29 показаны временные диаграммы работы однопороговой и гистерезисных схем сравнения в случае, когда входной сигнал кроме полезной составляющей налет некоторый высокочастотный сигнал помехи.

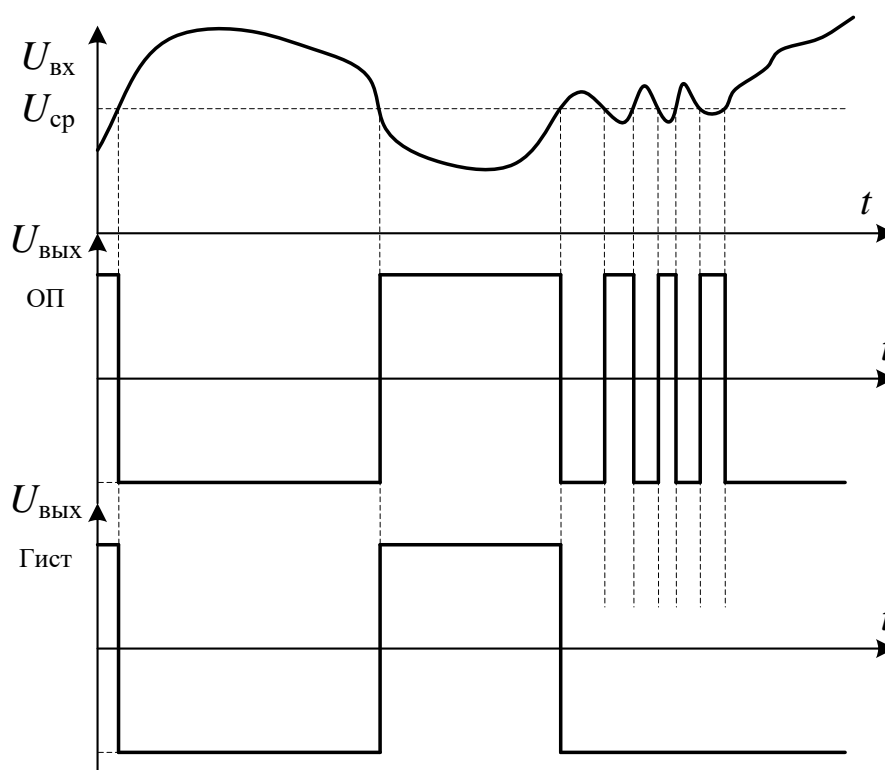


Рис. 5.29. Временная диаграмма при действии помех

Очевидно, что в случае использования однопороговой схемы сравнения на выходе устройства будет сформировано несколько выходных импульсов (так называемый «дребезг» выходного напряжения), затрудняющих получение однозначного результата. В случае использования гистерезисного компаратора с правильным выбором напряжений срабатывания и отпускания этого удастся избежать и получить на выходе однозначный результат сравнения.



#### 5.10.4. Интегральные компараторы

Интегральные компараторы отличаются от схем сравнения, выполненных на ОУ общего применения, тем, что их выходной сигнал согласован по уровню с напряжениями, используемыми в цифровой технике для отображения сигналов логических нуля и единицы. Разработка таких ИС, имеющих (как и стандартный ОУ) два входа (инвертирующий и неинвертирующий), была обусловлена тем, что хотя схемы сравнения на ОУ и могут обеспечить высокую точность сравнения входных напряжений и сформировать на выходе сигналы необходимых (цифровых) уровней, они требуют для этого введения большого числа дополнительных элементов и, как правило, не могут обеспечить нужного быстродействия.

Быстродействие компараторов принято характеризовать их временем восстановления  $t_{\text{вос}}$ . Это время измеряется при подаче на его входы некоторых стандартных сигналов. В этом случае время восстановления определяется как временной интервал между моментом равенства напряжений на входах компаратора и моментом, когда его выходное напряжение достигнет некоторого порогового уровня  $U_{\text{пор}}$  (рис. 5.30), которое определяется уровнем срабатывания логических схем.

Время восстановления  $t_{\text{вос}}$  можно разбить на два интервала: время задержки  $t_3$ , в течение которого выходное напряжение компаратора остается неизменным, и время нарастания  $t_{\text{н}}$ , причем  $t_3 \gg t_{\text{н}}$ . При разработке интегральных компараторов применяют специальные схемотехнические решения, направленные на снижение времени восстановления  $t_{\text{вос}}$  до сотен наносекунд.

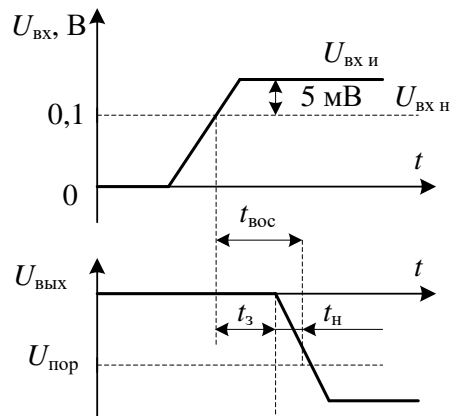


Рис. 5.30. Определение времени восстановления компаратора

В таблице приведены типовые параметры наиболее распространенных интегральных компараторов напряжения, которые характеризуются теми же параметрами, что и ОУ общего применения. Поэтому при формировании требуемого вида их передаточной характеристики возможно использование всех ранее рассмотренных схемотехнических решений для ОУ.

Параметры интегральных компараторов

Параметр	521СА1	521СА2	521СА3	521СА4
Напряжение смещения $U_{см}$ , мВ	1	3	3	4
Входной ток смещения $I_{см}$ , мкА	25	45	0,1	2
Разность входных токов $\Delta I_{см}$ , мкА	5	7	0,01	0,5
Допустимый дифференциальный сигнал, В	5	5	30	5
Время восстановления $t_{вос}$ , нс	40	40	200	15
Коэффициент усиления по напряжению $K_{УО}$ , В	1500	1700	200 000	2000

Компараторы на ОУ общего применения обычно используются при разработке высокоточных схем сравнения, работающих с медленно изменяющимися входными сигналами.

Интегральные компараторы применяются тогда, когда необходимо обеспечить высокое быстродействие разрабатываемых устройств, при этом в зависимости от конкретных требований используют стандартные высокоточные или высокоскоростные компараторы.

### Контрольные вопросы

1. Определите тип ООС, используемой в повторителе напряжения.
2. Почему коэффициент усиления неинвертирующего усилителя не может быть менее единицы?
3. Докажите, почему коэффициент усиления инвертирующего усилителя может быть уменьшен до нуля.
4. Как соотносятся фазы входного и выходного напряжений неинвертирующего и инвертирующего усилителей?

5. Докажите, что дифференциальный усилитель может выполнять математическую операцию вычитания двух чисел.
6. Покажите, как входные сопротивления схемы инвертирующего сумматора влияют на его выходное напряжение.
7. Почему возникает и как компенсируется напряжение смещения усилителя?
8. Разработайте схему усреднения 4-х входных напряжений.
9. Почему в общем случае схема сложения – вычитания нуждается в балансировке?
10. Спроектируйте схему, реализующую следующую зависимость входных и выходного напряжений:  $U_{\text{ВЫХ}} = 0,5U_{\text{ВХ1}} + 0,2U_{\text{ВХ2}}$   
 $U_{\text{ВХ1}} = 0,1\sin\omega t$ ,  $U_{\text{ВХ2}} = 1,5\sin(\omega t + \pi/2)$ .
11. Чем схема сравнения отличается от схемы усилителя?
12. Что такое логарифмический усилитель
13. Какие выходные напряжения могут формироваться на выходе схемы сравнения?
14. Что такое компараторный режим работы ОУ?
15. Назовите устройство сравнения, для которых коэффициент усиления всегда остаётся положительным.
16. Что такое нуль-детектор?
17. Какую передаточную характеристику имеет регенеративная схема сравнения?
18. Как можно изменить порог срабатывания однопороговой схемы сравнения?
19. Спроектируйте схему сравнения четырех входных напряжений.
20. Как задается смещение передаточной характеристики в гистерезисных схемах сравнения?
21. Какими преимуществами обладает гистерезисная схема сравнения по сравнению с однопороговой?
22. В чем основное отличие схем сравнения напряжений и схем усилителей, выполненных с использованием ОУ?

## **6. АНАЛОГО-ЦИФРОВЫЕ И ЦИФРОАНАЛОГОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ**

В электронных системах одинаково широко используется обработка информации, представленной в аналоговой и цифровой формах. Объясняется это тем, что первичная, исходная информация о различных физических величинах и процессах носит, как правило, аналоговый характер. Обработку же этой информации удобнее вести в цифровой форме. Использование полученных после цифровой обработки результатов также в большинстве случаев требует их аналогового представления. Следовательно, любая система, использующая цифровые методы обработки информации, должна содержать устройства взаимного преобразования аналоговых и цифровых сигналов. Роль таких устройств выполняют аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи (АЦП и ЦАП).

### **6.1. Цифроаналоговые преобразователи**

Цифро-аналоговым преобразователем (ЦАП) называется устройство, предназначенное для преобразования цифровой информации в аналоговую. Они используются для формирования сигнала в виде напряжения или тока, функционально связанного с управляющим кодом. В большинстве случаев эта функциональная зависимость является линейной. Наиболее часто ЦАП используются для сопряжения устройств цифровой обработки сигналов с системами, работающими с аналоговыми сигналами. Кроме этого, ЦАП используются в качестве узлов обратной связи в аналого-цифровых преобразователях и в устройствах сравнения цифровых величин с аналоговыми.

Области применения ЦАП достаточно широки. Они применяются в системах передачи данных, в измерительных приборах и испытательных установках, в генераторах сигналов сложных функций, для формирования изображений на экране дисплеев и др. В связи с этим разработано и выпускается большое количество интегральных микросхем ЦАП.

Схемы ЦАП можно классифицировать по различным признакам: принципу действия, виду выходного сигнала, полярности выходного сигнала, элементной базе и др.

По принципу действия наибольшее распространение получили ЦАП с суммированием токов и с делением напряжения.

По виду выходного сигнала ЦАП делят на два вида: с токовым выходом и выходом по напряжению. Для преобразования выходного тока ЦАП в напряжение обычно используются операционные усилители.

По полярности выходного сигнала ЦАП принято делить на однополярные и двухполярные.

При формировании выходного напряжения ЦАП под действием управляющего кода обычно используются источники опорного напряжения. В зависимости от вида источника опорного напряжения ЦАП делят на две группы: с постоянным опорным напряжением и с изменяющимся опорным напряжением. Работа с внешним источником опорного напряжения позволяет разделить все ЦАП на две группы: умножающие – работающие с изменяющимся во времени источником опорного сигнала, и неумножающие – работающие с источником, величина которого в течение всего времени работы устройства остается постоянной.

Управляющий код, подаваемый на вход ЦАП, может быть различным: двоичным, двоично-десятичным, Грея, унитарным и др. Кроме того, различными могут быть и уровни логических сигналов на входе ЦАП.

Кроме этого, ЦАП делят по основным характеристикам: количеству разрядов, быстродействию, точности преобразования, потребляемой мощности.

Интегральные схемы ЦАП могут выполняться как функционально завершенными, т. е. не требующими для своей работы дополнительных элементов, так и функционально незавершенными. В последнем случае в качестве внешних элементов, как правило, применяют источник опорного напряжения, операционный усилитель, регистры и т. д.

### **6.1.1. Основные параметры ЦАП**

Все параметры ЦАП можно разделить на две группы: статические, которые задают конечную точность преобразования и динамические, характеризующие быстродействие данного класса устройств. Статические характеристики преобразователей определяются видом характеристики преобразования, которая устанавливает соответствие между значениями аналоговой величины и цифрового кода. К ним относятся разрешающая способность, погрешность преобразования, диапазон значений выходного сигнала, характеристики управляющего кода, смещение нулевого уровня и некоторые другие.

К динамическим показателям ЦАП принято относить: время установления выходного сигнала, предельную частоту преобразования, динамическую погрешность. Рассмотрим некоторые из этих параметров.

Число разрядов ( $n$ ) – число разрядов кода, отображающего исходную аналоговую величину, которое может подаваться на вход ЦАП.

Разрешающая способность ЦАП определяется как величина, обратная максимальному количеству градаций выходного сигнала. Так, например, если разрешающая способность ЦАП составляет  $10^{-5}$ , то это означает, что максимальное число градаций выходного сигнала равно  $10^5$ . Иногда разрешающую способность ЦАП оценивают выходным напряжением при изменении входного кода на единицу младшего разряда, т. е. шагом квантования  $h$ . Очевидно, что чем больше разрядность ЦАП, тем выше его разрешающая способность и меньше шаг квантования.

Погрешность преобразования ЦАП принято делить на дифференциальную и погрешность нелинейности. С ростом кода на входе ЦАП растет и выходное напряжение, однако при увеличении напряжения могут быть отклонения от линейной зависимости. Погрешностью нелинейности называют максимальное отклонение выходного напряжения от идеальной прямой во всем диапазоне преобразования.

Дифференциальной погрешностью называют максимальное отклонение от линейности для двух смежных значений входного кода.

Напряжение смещения нуля определяется выходным напряжением при входном коде, соответствующем нулевому значению.

Время установления ( $t_{уст}$ ) — это интервал времени от подачи входного кода до вхождения выходного сигнала в заданные пределы, определяемые погрешностью.

Максимальная частота преобразования — наибольшая частота дискретизации, при которой все параметры ЦАП соответствуют заданным значениям.

По совокупности параметров ЦАП принято делить на три группы: общего применения, прецизионные и быстродействующие. Быстродействующие ЦАП имеют время установления меньше 100 нс. К прецизионным относят ЦАП, имеющие погрешность нелинейности менее 0,1%.

### 6.1.2. ЦАП с суммированием токов

На практике наибольшее применение нашли схемы ЦАП с суммированием эталонных источников тока. На рис. 6.1 показана структурная схема ЦАП с использованием матрицы взвешенных резисторов. Сопротивления резисторов пропорциональны весовым коэффициентам входного кода.

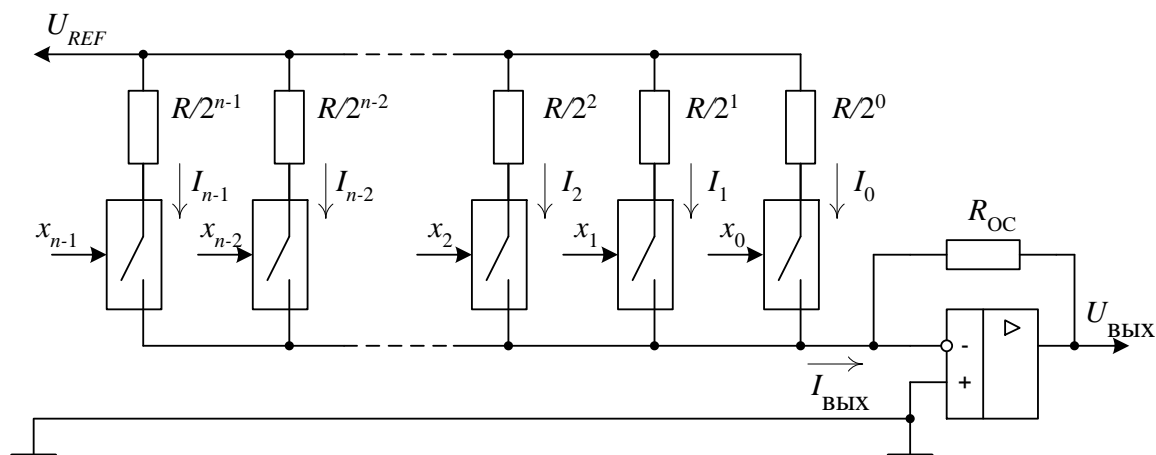


Рис. 6.1. Схема ЦАП с использованием матрицы взвешенных резисторов

Устройство содержит  $n$  источников тока  $I_0, I_1, \dots, I_{n-1}$  и  $n$  управляемых ключей, где  $n$  — число разрядов входного кода.

Источники тока задаются с помощью источника эталонного (опорного) напряжения  $U_{REF}$ . Ток через резисторы матрицы определяется выражением  $I_i = U_{REF} / R_i = 2^i \cdot U_{REF} / R$ .

Входной двоичный код подается на входы управления ключами  $x_i$ . Если в  $i$ -м разряде входного кода присутствует сигнал логической единицы ( $x_i = 1$ ), то соответствующий ключ замыкается, и ток через задающий резистор поступает на вход усилителя. В результате суммарный выходной ток  $I_{ВЫХ}$  определяется выражением

$$I_{ВЫХ} = \frac{U_{REF}}{R} \sum_{i=0}^{n-1} 2^i \cdot x_i,$$

где  $x_i$  может принимать значения 0 или 1. Таким образом, суммарный ток пропорционален значению входного кода.

Для получения напряжения, пропорционального входному коду, суммарный ток подают на вход операционного усилителя, и выходное напряжение определяется по формуле

$$U_{ВЫХ} = U_{REF} \cdot \frac{R_{OC}}{R} \sum_{i=0}^{n-1} 2^i \cdot x_i. \quad (6.1)$$

Недостатком ЦАП с взвешенными резисторами является широкий диапазон изменения сопротивлений. Для обеспечения высокой точности преобразования значения сопротивлений этих резисторов должны выдерживаться с прецизионной точностью. Например, для 12-ти разрядного ЦАП сопротивления первого и последнего резисторов должны отличаться в  $2^{11} = 2048$  раз, что весьма трудно выполнить технологически.

Для устранения этого недостатка используются ЦАП с резистивной матрицей  $R$ - $2R$ , выполненные только на резисторах двух номиналов  $R$  и  $2R$ . Структурная схема такого ЦАП приведена на рис. 6.2.

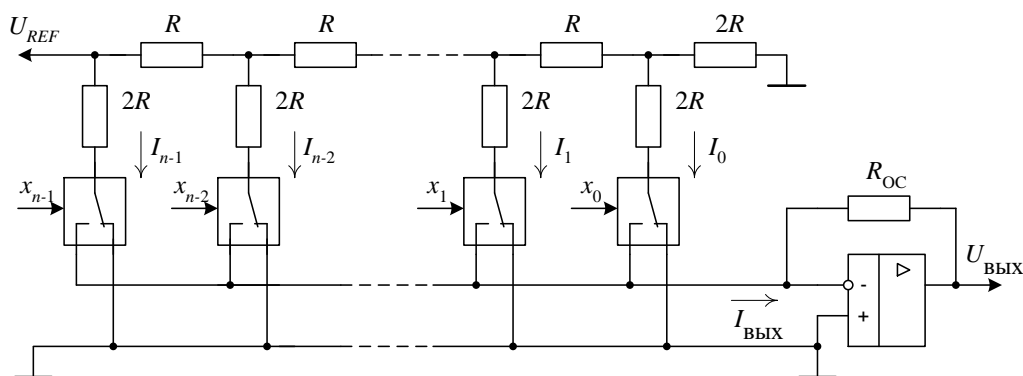


Рис. 6.2. Схема ЦАП с матрицей резисторов  $R$ - $2R$



Входной ток задается источником опорного  $U_{REF}$  напряжения и последовательно делится на узлах R-2R по двоичному закону. Токи ветвей  $I_0, I_1, \dots, I_{n-1}$  через ключи суммируются на входе операционного усилителя. На выходе усилителя формируется выходное напряжение  $U_{ВЫХ}$  преобразователя, которое определяется по формуле

$$U_{ВЫХ} = U_{REF} \cdot \frac{R_{OC}}{R} \cdot \frac{(2^{(n-1)} \cdot x_{n-1} + 2^{(n-2)} \cdot x_{n-2} + \dots + 2^i \cdot x_i + \dots + 2^0 \cdot x_0)}{2^n}.$$

При подаче на вход двоичного кода, состоящего из всех единиц, на выходе ЦАП установится максимальное напряжение

$$U_{ВЫХ_{max}} = U_{REF} \cdot \frac{R_{OC}}{R} \cdot \left(1 - \frac{1}{2^n}\right).$$

Минимальное выходное напряжение получается при нулевом входном коде и очевидно  $U_{ВЫХ_{min}} = 0$ .

Шаг квантования  $h$ , т.е. величина, на которую изменяется выходное напряжение при изменении кода на единицу младшего разряда, определяется по формуле  $h = U_{REF} \cdot \frac{R_{OC}}{R \cdot 2^n}$ .

Полученные выражения показывают, что в ЦАП рассматриваемого типа максимальное выходное напряжение всегда меньше опорного напряжения  $U_{REF}$  на величину шага квантования  $h$ :

$$U_{ВЫХ_{max}} = U_{REF} \cdot \frac{R_{OC}}{R} - h,$$

или при  $R_{OC} = R$  получаем  $U_{ВЫХ_{max}} = U_{REF} - h$ .

Например, для 4-х разрядного ЦАП, при  $R_{OC} = R$  и при  $U_{REF} = 10В$  получаем

$$U_{ВЫХ_{max}} = 10 \cdot \left(1 - \frac{1}{2^4}\right) = 10 \cdot (1 - 0,0625) = 9,375В;$$

$$h = 10 \cdot \frac{1}{2^4} = 0,625В.$$

График изменения выходного напряжения в зависимости от входного двоичного кода показан на рис. 6.3.

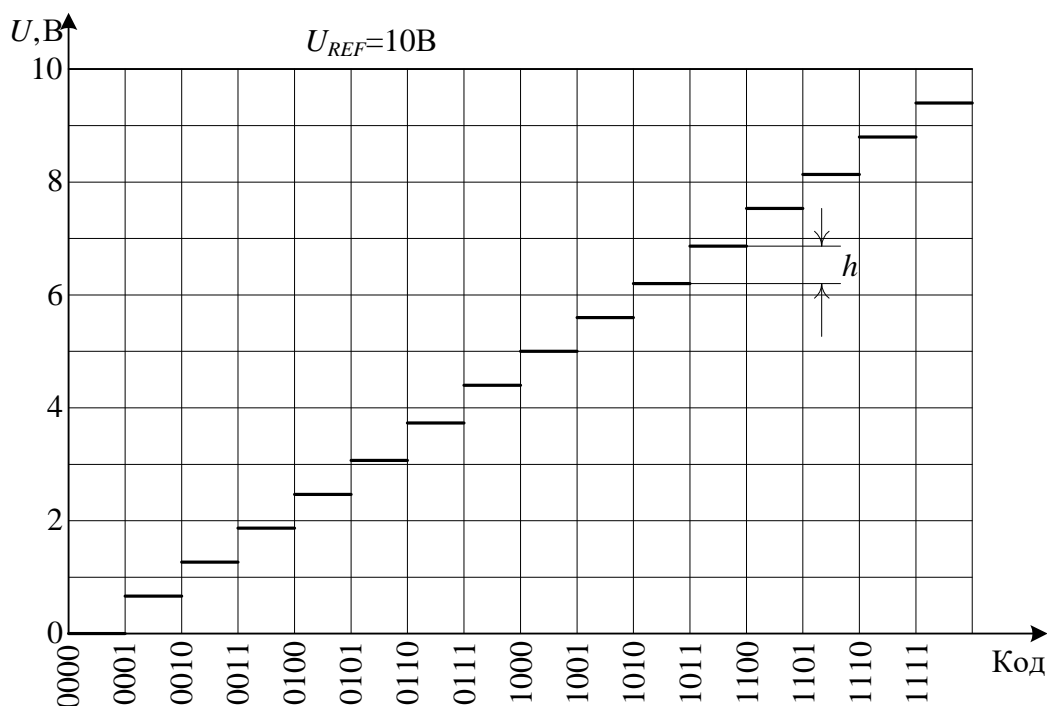


Рис. 6.3. График изменения выходного напряжения ЦАП

Условное обозначение десятиразрядного ЦАП и схема его подключения показаны на примере микросхемы К572ПА1 (рис. 6.4). Такая схема обеспечивает однополярный режим работы.

На цифровые входы  $DB0...DB9$  подается десяти разрядный двоичный код. Эта микросхема имеет внутренний резистор обратной связи  $R_{OC}$ , величина которого равна сопротивлению резистора матрицы, т.е.  $R_{OC} = R$ , и, следовательно, отношение  $\frac{R_{OC}}{R} = 1$ .

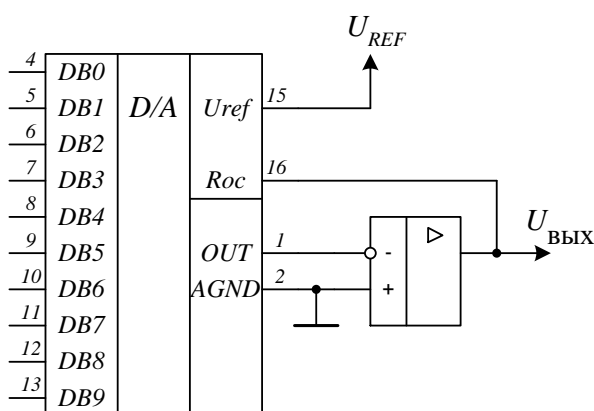


Рис.6.4. Схема подключения ЦАП К572ПА1

Необходимо заметить, что операционный усилитель включен в режиме инвертора, так как выход OUT преобразователя подключен к инверсному входу усилителя. Следовательно, при  $U_{REF} = 10\text{ В}$  выходное напряжение усилителя будет изменяться в диапазоне от  $0\text{ В}$  до  $-U_{\text{ВЫХ}_{max}} = -(U_{REF} - h)$ .

$$\text{Шаг квантования } h = 10 \cdot \frac{1}{2^{10}} = 0,009765625B.$$

Изменение выходного напряжения в зависимости от входного кода приведено в таблице 6.1.

Для получения двухполярного выходного сигнала ЦАП применяют схему включения, показанную на рис. 6.5.

В этой схеме используются два операционных усилителя, включенных в режиме инвертора. Выходное напряжение  $U_{\text{ВЫХ1}}$  первого

усилителя аналогично выходному напряжению однополярного ЦАП.

На втором усилителе осуществляется суммирование напряжений  $U_{\text{ВЫХ1}}$  и  $U_{\text{REF}}$ . Причем коэффициент усиления усилителя для напряжения  $U_{\text{REF}}$  равен  $k_1 = \frac{R_{\text{OC}}}{R_{\text{ВХ1}}} = \frac{2R}{2R} = 1$ , а для напряжения  $U_{\text{ВЫХ1}}$

$$\text{равен } k_2 = \frac{R_{\text{OC}}}{R_{\text{ВХ2}}} = \frac{2R}{R} = 2$$

Таблица 6.1

Изменение выходного напряжения ЦАП

Двоичный код	$U_{\text{ВЫХ}}$
00.....00	0
00.....01	$-2^{-10} U_{\text{REF}}$
...	...
10.....00	$-U_{\text{REF}}/2$
...	...
11.....11	$-(1-2^{-10}) U_{\text{REF}}$

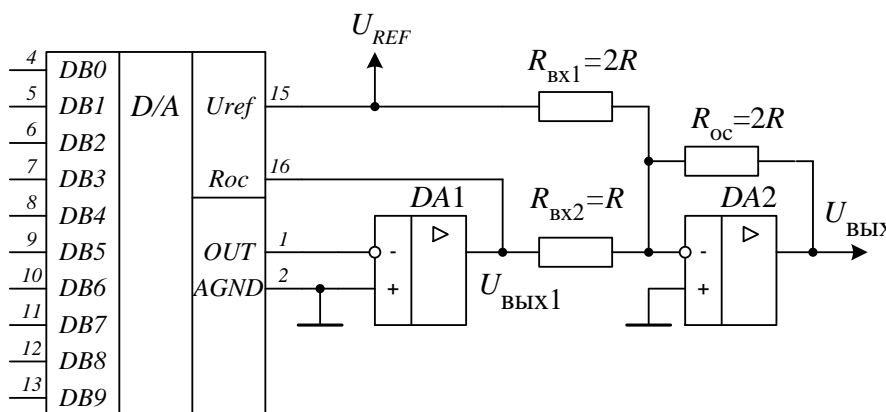


Рис. 6.5. Двухполярный ЦАП

На рис. 6.6, а показаны графики изменения напряжений в зависимости от входного двоичного кода.  $U_{\text{ВЫХ1}}$  – выходное напряжение первого усилителя.  $U_{\text{REF}}$  – опорное напряжение. На выходе второго усилителя в соответствии с коэффициентом усиления

$k_2$  формируется напряжение  $2U_{\text{ВЫХ1}}$ . Так как усилитель инвертирует сигналы, то выходное напряжение первого усилителя и опорное напряжение формируются в виде  $-2U_{\text{ВЫХ1}}$  и  $-U_{\text{REF}}$ . В результате суммирования этих напряжений на выходе второго усилителя формируется напряжение  $U_{\text{ВЫХ}}$ , которое изменяется от  $-U_{\text{REF}}$  до  $+U_{\text{REF}}$ .

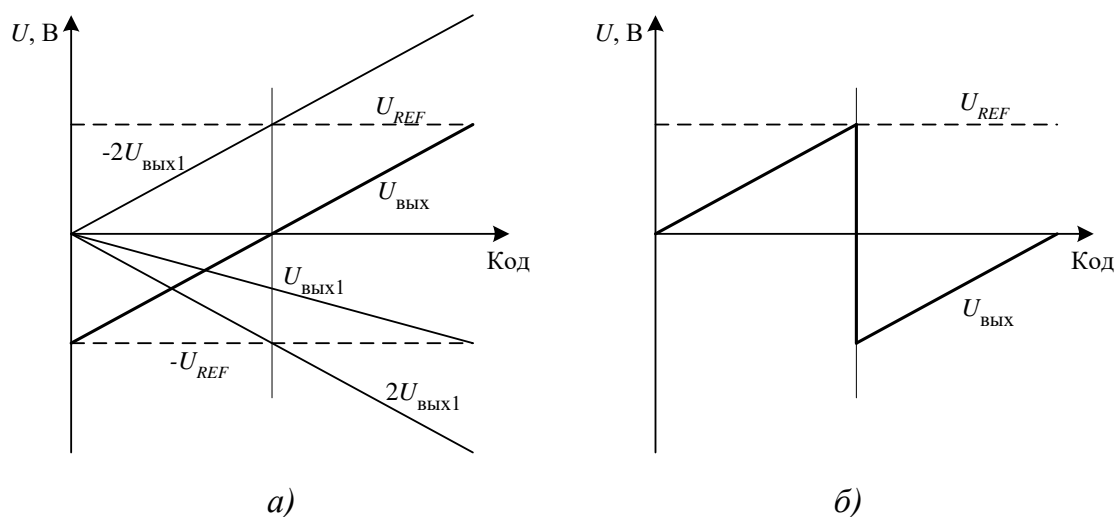


Рис. 6.6. Графики напряжений двухполярного ЦАП

Как известно из информатики для получения положительных и отрицательных чисел, т.е. чисел со знаком используется формат чисел, в которых старший двоичный разряд является знаковым. Если в старший разряд равен нулю (0101101), то число положительное, а если единице (1101101), то отрицательное.

Таким образом, при изменении кода от 000...00 до 011...11 число является положительным, а далее от 100...00 до 111...11 число будет отрицательным, причем число 011...11 – максимальное положительное, а число 100...00 – минимальное отрицательное.

Для реализации этой зависимости в ЦАП на входе старшего разряда ставится инвертор. График изменения выходного напряжения в зависимости от входного двоичного кода будет иметь вид, показанный на рис. 6.6, б) и эта зависимость для десятиразрядного ЦАП представлена в таблице 6.2.

В рассмотренных ЦАП для получения выходного напряжения подаваемый двоичный код необходимо зафиксировать на его входе, например, использовать дополнительный внешний регистр. Однако выпускаются ЦАП с внутренним регистром хранения входного двоичного кода. Например, микросхема К572ПА2 представляет собой 12-ти разрядный ЦАП с двумя встроенными регистрами хранения. Он имеет такие режимы работы, как прямое прохождение входного кода непосредственно в ЦАП; запись данных в первый регистр; перезапись данных из первого регистра во второй, при этом информацию с входа ЦАП можно снимать.

Таблица 6.2. Изменение выходного напряжения двухполярного ЦАП

Двоичный код	$U_{\text{вых}}$
00.....00	0
00.....01	$2^{-10} U_{REF}$
...	
011.....11	$(1-2^{-10}) U_{REF}$
10.....00	$- U_{REF}$
...	
11.....11	$-(1-2^{-10}) U_{REF}$

Приведем примеры еще некоторых типов ЦАП:

К594ПА1 – прецизионный 12-ти разрядный ЦАП (с лазерной подгонкой матрицы резисторов  $R-2R$ );

К1108ПА1 – быстродействующий 12-ти разрядный ЦАП. С двухполярным выходом.

### 6.1.3. Применение цифроаналоговых преобразователей

ЦАП широко применяются в устройствах аналогового вывода способных формировать непрерывное изменение физической величины любого типа в заданном диапазоне.

Ограничимся областью электрических величин. В системах управления 95% устройств аналогового вывода это формирователи сигналов напряжения произвольной формы в диапазоне  $-10В \leq U \leq +10В$ , при токе нагрузки  $I \leq 200\text{мА}$ . Если необходимы большие значения напряжения и тока, то применяют силовые преобразователи.

Различают 3 группы устройств аналогового вывода:

- управляемые ЦАП (умножители);
- программируемые ЦАП;
- генераторы сигналов специальной формы.

### 1. Умножители

Эти устройства (рис. 6.7) состоят из двух цифро-аналоговых преобразователей, на входы которых поступают двоичные коды управления, записанные в регистры хранения цифровой информации. Выходное напряжение  $U_{\text{ВЫХ1}}$  с выхода усилителя первого ЦАП задается первым кодом при постоянном опорном напряжении  $U_{\text{ОП1}}$ . Это напряжение ( $U_{\text{ВЫХ1}}$ ) является опорным для второго ЦАП, на вход которого подается второй двоичный код. Таким образом,  $U_{\text{ВЫХ2}}$  формируется перемножением двух управляющих двоичных кодов, т.е.  $U_{\text{ВЫХ2}} = f\{П[\text{Код1}, \text{Код2}]\}$ . Устройство управления должно формировать код напряжения  $U_{\text{ВЫХ1}}$  в  $RG1$  и периодически изменять значение кода в  $RG2$  для формирования  $U_{\text{ВЫХ2}}$  заданной формы.

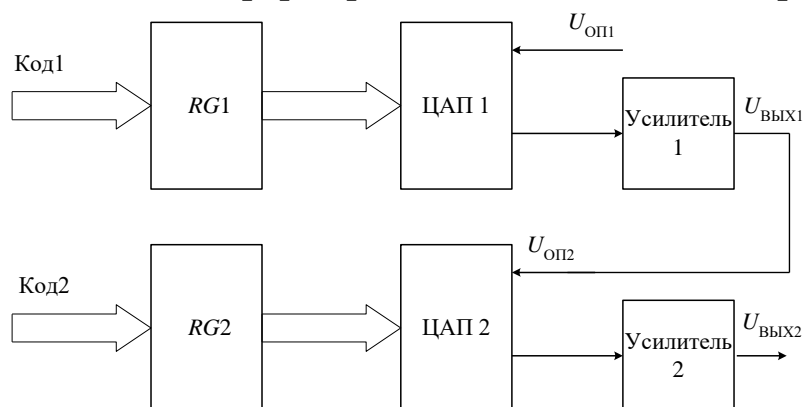


Рис. 6.7. Управляемый ЦАП

Недостатком управляемых ЦАП при их простой схемной реализации является следующее. В современных системах управления период выдачи управляющих сигналов может быть менее 5 мс. А при сложных алгоритмах формирования  $U_{\text{ВЫХ2}}$  интервал между сменой кода может быть недопустимо большим.

### 2. Программируемые ЦАП

Устройство управления предварительно рассчитывает форму и характер изменения  $U_{\text{ВЫХ}}$ , которое в цифровом виде записывается в память (ОЗУ) (рис. 6.8).

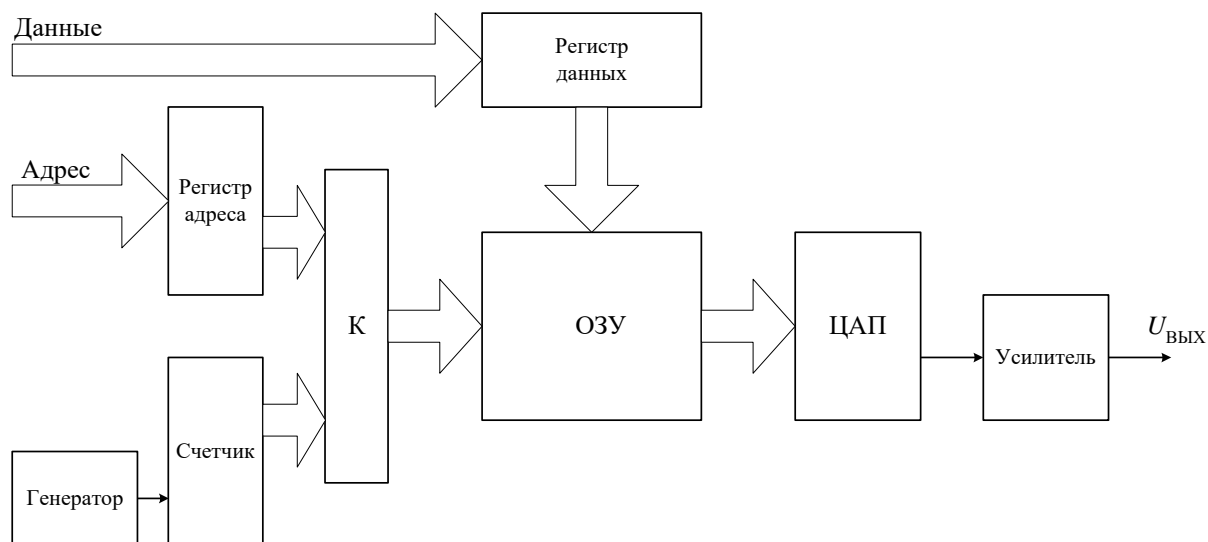


Рис. 6.8. Программируемый ЦАП

На этапе отработки заданной функции адрес ОЗУ последовательно перебирается счетчиком с частотой  $f_T$  генератора, которая определяет скорость изменения  $U_{\text{ВЫХ}}$ .

Скорость изменения выходного сигнала не зависит от его формы и определяется только частотой генератора. Если выходной сигнал имеет сложную форму, в ОЗУ хранится большой объем информации и частота генератора  $f_T$  должна быть очень высокой (1...10 МГц).

### ***3. Генераторы сигналов специальной формы.***

Эти устройства (рис. 6.9) предназначены для получения сигналов любой произвольной формы с заданными параметрами, например синусоиды, экспоненты, пилообразной формы и т.д. (рис. 6.10).

Форма характеристики  $U_{\text{ВЫХ}}$  однократно программируется в постоянной памяти (ПЗУ), а затем воспроизводится с заданной частотой.

При проектировании многоканальных генераторов, например для получения трехфазного синусоидального генератора, имеющего форму выходных сигналов, показанную на рис. 6.11, необходимо в генераторе использовать три ЦАП. На их входы подается код с выхода ПЗУ, в котором записана форма характеристик для каждого канала. В таком устройстве обеспечивается жесткая связь между каналами и значение фазового сдвига  $\varphi$  постоянно.

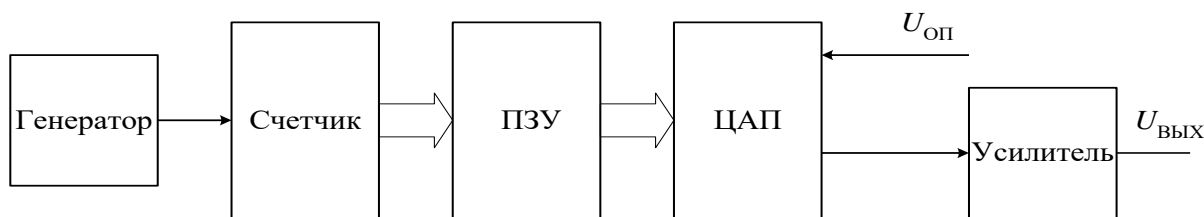


Рис. 6.9. Генератор сигналов специальной формы

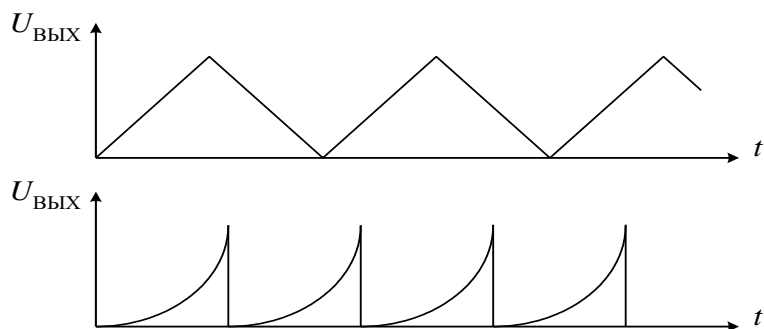


Рис. 6.10. Форма выходного сигнала

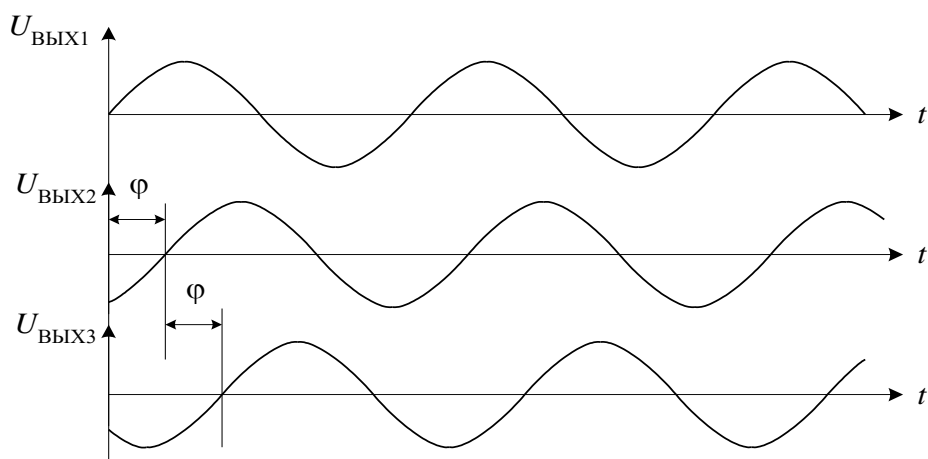


Рис. 6.11. Форма сигналов трехфазного генератора

Недостатком генераторов является сложность изменения формы. В этом случае необходимо перепрограммировать ПЗУ.

### ***Устройства аналогового вывода без гальванической связи с сигналами управления***

Применение оптоэлектронной развязки позволяет защитить систему управления от проникновения помех от силовых цепей в устройствах вывода аналоговых сигналов. Существует несколько вариантов построения таких устройств.



Устройства с гальванической развязкой по цифровому сигналу содержат оптоэлектронные коммутаторы (оптроны), например на оптодиодах. При использовании параллельной передачи двоичного кода (рис. 6.12) необходимо применить столько оптронов, сколько разрядов имеет ЦАП. Выходные данные с накопительного регистра в параллельном коде поступают на оптроны. К выходу оптронов подключены усилители-формирователи УФ, которые формируют необходимый уровень сигналов для ЦАП, например уровень ТТЛ. Недостатком такого устройства является большое количество оптронов.

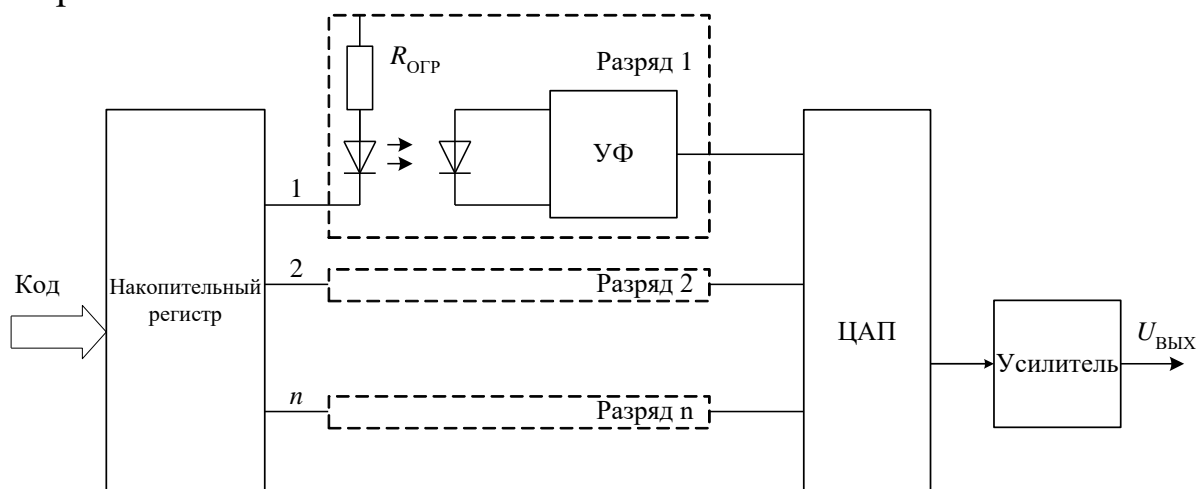


Рис.6.12. Использование параллельной передачи двоичного кода

Последовательная передача двоичного кода осуществляется по двум линиям. По одной линии передаются данные, а по второй сигналы синхронизации. Для преобразования параллельного двоичного кода в последовательный, и наоборот, последовательного в параллельный, применяют сдвиговые регистры. На рис. 6.13 показано устройство аналогового вывода с использованием последовательной передачи двоичного кода.

Данные с устройства управления записываются в сдвиговый регистр, который по сигналу синхронизации преобразует их в последовательный код и выдает на линию D. После оптронной развязки эти данные поступают во второй сдвиговый регистр, который их преобразует в параллельный код и передает в ЦАП.

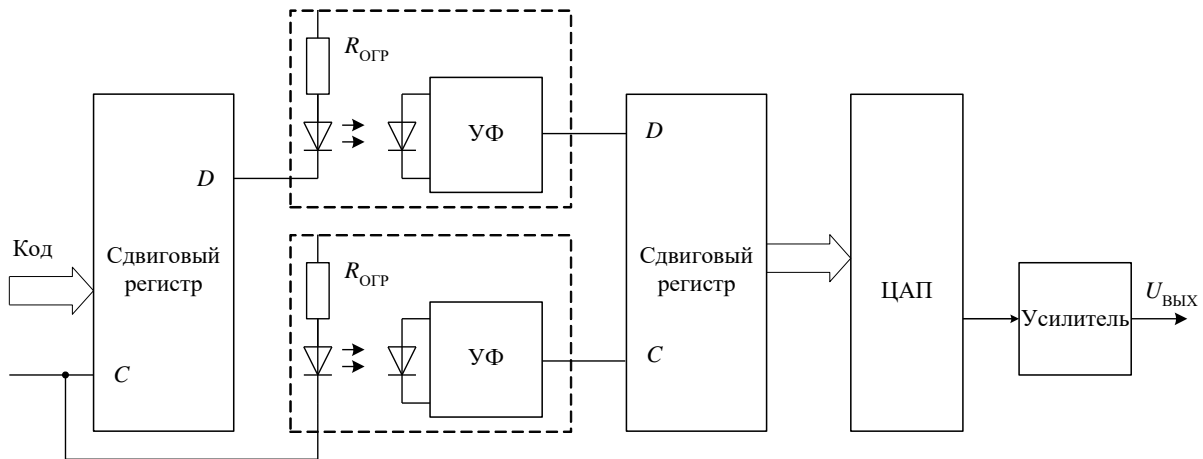


Рис. 6.13. Использование последовательной передачи двоичного кода

В этой схеме используется два оптрона независимо от количества разрядов ЦАП, однако это устройство имеет меньшее быстродействие из-за необходимости преобразования одного кода в другой.

В устройствах с гальванической развязкой по аналоговому сигналу применяют двойные аналоговые (линейные) оптроны (рис. 6.14).

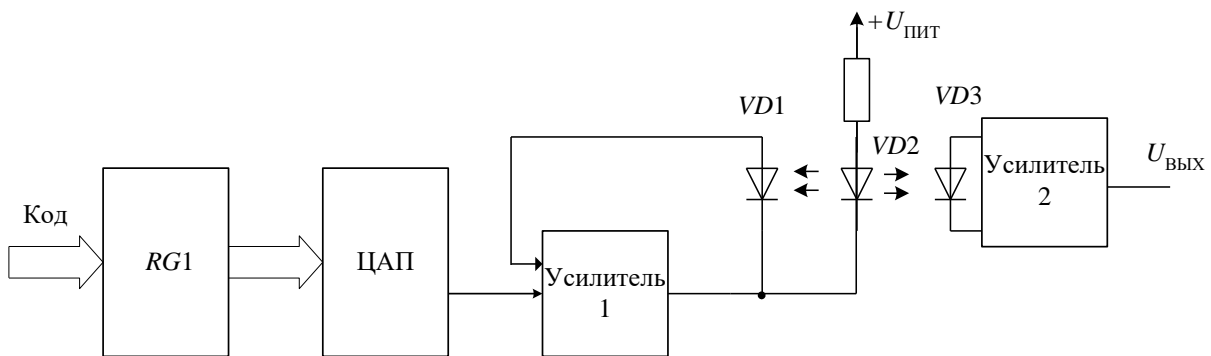


Рис. 6.14. Устройства с гальванической развязкой по аналоговому сигналу

Вольтамперная характеристика диода имеет нелинейную зависимость. На рис. 6.15 эта характеристика изображена для диода  $VD3$ . При использовании двойного оптодиода диод  $VD1$  включен в цепь обратной связи первого усилителя и на его выходе формируется обратная вольтамперная характеристика ( $U_{ВЫХ1}$ ). В итоге линейризуется общий канал передачи сигнала и на выходе второго усилителя формируется суммарная линейная характеристика. Для качественной передачи сигнала необходимо чтобы вольтамперные характеристики диодов  $VD1$  и  $VD3$  были идентичными.

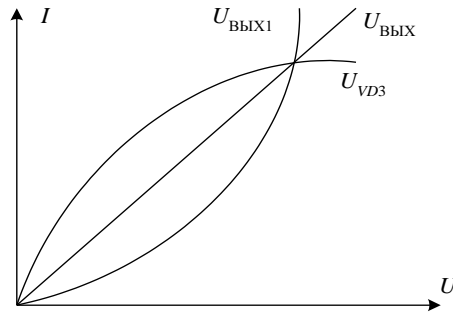


Рис. 6.15. Вольтамперные характеристики

### ***Увеличение мощности аналогового сигнала***

Как известно большинство операционных усилителей (ОУ), подключенных к выходу цифро-аналогового преобразователя, обеспечивают выходное напряжение в диапазоне  $-10\text{В} \leq U \leq +10\text{В}$ , при токе нагрузки  $I$  не более 10мА. Для увеличения выходной мощности к выходу ОУ подключают дополнительные усилители на транзисторах. Наиболее широкое применение нашли двухтактные усилительные каскады на транзисторах разной проводимости (рис. 6.16).

Параметры такого усилителя (выходное напряжение  $U$ , ток нагрузки  $I$ ) зависят от типа выбранных транзисторов и могут достигать: напряжение – сотни вольт, ток – несколько ампер. В этом случае резистор обратной связи  $R_{OC}$  должен быть подключен к выходу транзисторного каскада, а не к выходу ОУ.

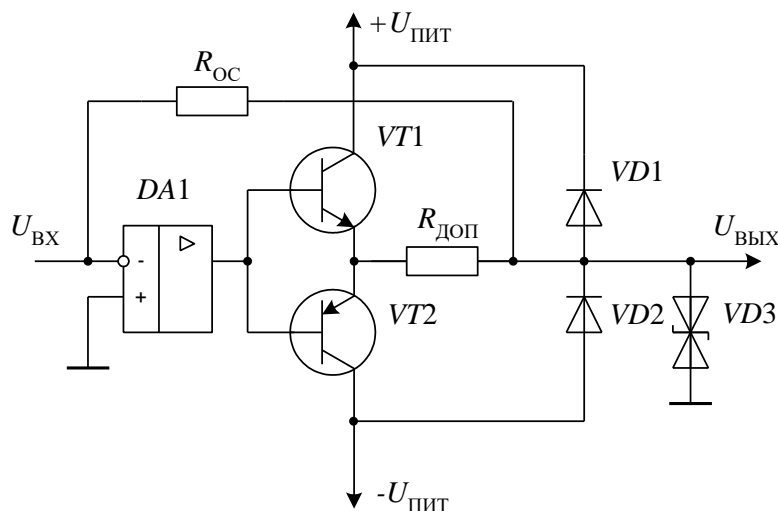


Рис. 6.16. Двухтактный усилительный каскад на транзисторах

Диоды  $VD1$  и  $VD2$  выполняют функцию защиты выхода усилителя от перенапряжения. При попадании на выход напряжения большего, чем напряжение источника питания, диоды  $VD1$  или  $VD2$  открываются и «сливают» лишнюю энергию в источник питания. Симметричный стабилитрон  $VD3$  ограничивает выходное напряжение усилителя на уровне напряжения стабилизации стабилитрона. Резистор  $R_{доп}$  обеспечивает токоограничение. При коротком замыкании нагрузки через нее протекает ток  $I_{кз} = \frac{U_{пит} - U_{прVT}}{R_{доп}}$ , где

$U_{прVT}$  – прямое напряжение транзистора. Ток короткого замыкания должен быть меньше максимального тока коллектора транзистора  $VT1$  или  $VT2$ .

Параллельно резистору  $R_{доп}$  может быть подключена схема индикации, выполненная на мостовом выпрямителе и светодиоде, как показано на рис. 6.17. При возрастании тока нагрузки, вплоть до тока короткого замыкания на резисторе  $R_{доп}$  создается падение напряжения, что приводит к свечению светодиода.

## 6.2. Аналого-цифровые преобразователи

Аналого-цифровой преобразователь – устройство, предназначенное для преобразования непрерывно изменяющейся во времени аналоговой физической величины в эквивалентные ей значения числовых кодов.

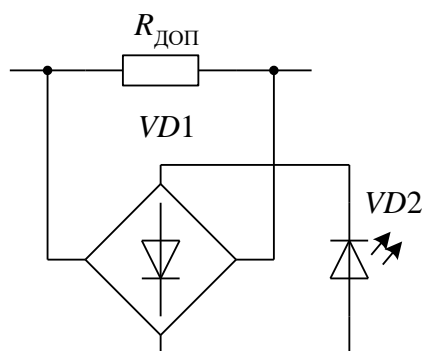


Рис. 6.17. Индикация перегрузки

В качестве аналоговой физической величины в общем случае могут фигурировать различные параметры, например угол поворота, линейное перемещение, скорость движения, температура, давление жидкости или газа и т.д. В дальнейшем под этой величиной будем понимать напряжение либо ток, которые, при необходимости, можно легко преобразовать в другие физические величины.

В общем случае напряжение характеризуется его мгновенным значением  $u(t)$ . Для оценки напряжения можно также пользоваться его средним значением за выбранный промежуток времени.

В связи с этим все типы АЦП можно разделить на две группы: АЦП мгновенных значений напряжения и АЦП средних значений напряжения. Так как операция усреднения предполагает интегрирование мгновенного значения напряжения, то АЦП средних значений часто называют интегрирующими.

Процесс аналого-цифрового преобразования предполагает последовательное выполнение следующих операций:

выборка значений исходной аналоговой величины в некоторые наперед заданные дискретные моменты времени, т. е. дискретизация сигнала по времени;

квантование (округление до некоторых известных величин) полученной в дискретные моменты времени последовательности значений исходной аналоговой величины по уровню;

кодирование – замена найденных квантованных значений некоторыми числовыми кодами.

Процедура аналого-цифрового преобразования непрерывного сигнала представляет собой преобразование непрерывной функции напряжения  $u(t)$  в последовательность чисел  $u(t_m)$ , отнесенных к некоторым фиксированным моментам времени, где  $m = 0, 1, 2, \dots$ . При дискретизации непрерывная функция  $u(t)$  преобразуется в последовательность ее отсчетов  $u(t_m)$ , как показано на рис. 6.18.

Вторая операция, называемая квантованием, состоит в том, что мгновенные значения функции  $u(t)$  ограничиваются только определенными уровнями, которые называются уровнями квантования. В результате квантования непрерывная функция принимает вид ступенчатой кривой  $u_k(t)$ .

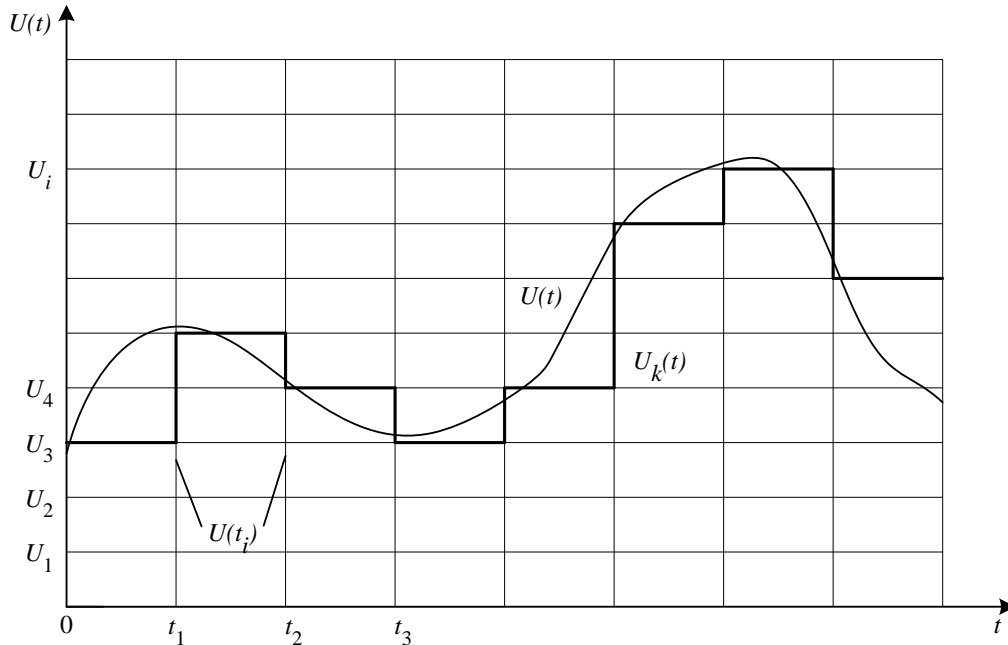


Рис. 6.18. Дискретизация и квантование непрерывного сигнала

Третья операция, называемая кодированием, представляет дискретные квантованные величины в виде цифрового кода, т. е. каждому дискретному значению  $u_k(t)$  ставится в соответствие некоторый код, подчиненных определенному закону.

В АЦП используют четыре основных типа кодов: натуральный двоичный, десятичный, двоично-десятичный и код Грея. Кроме этого, АЦП, предназначенные для вывода информации в десятичном коде, выдают на своем выходе специализированный код для управления семисегментными индикаторами.

Большинство АЦП работают с выходом в натуральном двоичном коде, при котором каждому положительному числу  $N$  ставится в соответствие код  $\{x_i\} = x_{n-1}x_{n-2}\dots x_1x_0$ ,

где  $x_i$  принимает значения нуля или единицы. При этом положительное число в двоичном коде имеет вид

$$N = x_{n-1} \cdot 2^{n-1} + x_{n-2} \cdot 2^{n-2} + \dots + x_1 \cdot 2^1 + x_0 \cdot 2^0.$$

Такой код принято называть прямым: его крайний правый разряд является младшим, а крайний левый – старшим. Прямой код пригоден лишь для работ с однополярными сигналами. Полный диапазон преобразуемого сигнала равен  $2n$ , а  $N_{max} = 2^n - 1$ .

Если АЦП должен работать с двухполярными числами, то наиболее часто используют дополнительный код.

### ***6.2.1. Основные параметры АЦП***

Все параметры АЦП также как и для ЦАП делятся на две группы: статические и динамические.

К статическим характеристикам АЦП относят: абсолютные значения и полярность входных сигналов, входное сопротивление, выходное сопротивление, значения напряжений и токов источников питания, количество двоичных или десятичных разрядов выходного кода, погрешности преобразования постоянного напряжения и др.

К динамическим параметрам АЦП относят: время преобразования, максимальную частоту дискретизации, динамическую погрешность и др.

Рассмотрим некоторые из этих параметров более подробно. Основной характеристикой АЦП является его разрешающая способность, которую принято определять величиной, обратной максимальному числу кодовых комбинации на выходе АЦП. Разрешающую способность можно выражать в процентах, в количестве разрядов или в относительных единицах. Например, 10-разрядный АЦП имеет разрешающую способность  $1/1024 \approx 10^{-3} = 0,1\%$ . Если напряжение шкалы для такого АЦП равно 10В, то абсолютное значение разрешающей способности будет около 10 мВ.

Дифференциальную нелинейность определяют через идентичность двух соседних приращений сигнала, т.е. как разность напряжений двух соседних квантов.

Интегральная нелинейность АЦП характеризует идентичность приращений во всем диапазоне входного сигнала. Обычно ее определяют по максимальному отклонению сглаженной характеристики преобразования от идеальной прямой линии.

Время преобразования обычно определяют как интервал времени от начала преобразования до появления на выходе АЦП устойчивого кода входного сигнала. Для одних типов АЦП это время постоянное и не зависит от значения входного сигнала, для других АЦП это время зависит от значения входного сигнала.

Максимальная частота дискретизации – это частота, с которой возможно преобразование входного сигнала, при условии, что выбранный параметр (например, абсолютная погрешность) не

выходит за заданные пределы. Иногда максимальную частоту преобразования принимают равной обратной величине времени преобразования. Однако это пригодно не для всех типов АЦП.

Все типы используемых АЦП можно разделить по признаку измеряемого значения напряжения на две группы: АЦП мгновенных значений напряжения и АЦП средних значений напряжения (интегрирующие АЦП).

### 6.2.2. АЦП мгновенных значений напряжения

Они в свою очередь разделяются на следующие основные виды: последовательного счета, последовательного приближения, параллельные и параллельно-последовательные.

#### АЦП последовательного счета

Структурная схема АЦП последовательного счета приведена на рис. 6.19. Входное напряжение  $U_{ВХ}$ , которое необходимо преобразовать в эквивалентный двоичный код, подается на первый вход компаратора. На второй вход подается напряжение  $U_{ЦАП}$  с выхода ЦАП. Компаратор выполняет сравнение этих напряжений. Если  $U_{ВХ} > U_{ЦАП}$ , то на выходное напряжение компаратора  $U_{К}$  равно логической единице, в противном случае – логическому нулю.

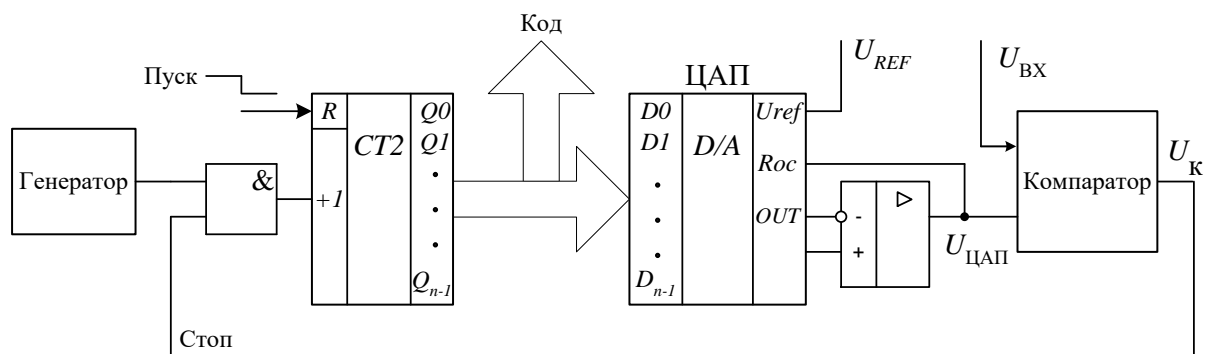


Рис. 6.19. АЦП последовательного счета

В исходном состоянии на вход сброса счетчика подан активный логический сигнал. Счетчик сброшен в ноль и подсчет входных импульсов запрещен. Так как выходной код счетчика равен нулю, то и выходное напряжение ЦАП  $U_{ЦАП} = 0$ . Если  $U_{ВХ} > 0$ , то  $U_{К} = 1$ , и тактовые импульсы с генератора через открытый элемент «И»



поступают на вход счетчика. Но подсчет этих импульсов запрещен, т.к. на входе сброса  $R$  присутствует активный сигнал.

Работа преобразователя начинается с переключения сигнала «ПУСК» в состояние логического нуля, который разрешает работу счетчика, и его выходной код  $N$  увеличивается, как показано на рис. 6.20. Соответственно происходит ступенчатое увеличение выходного напряжения  $U_{ЦАП}$ .

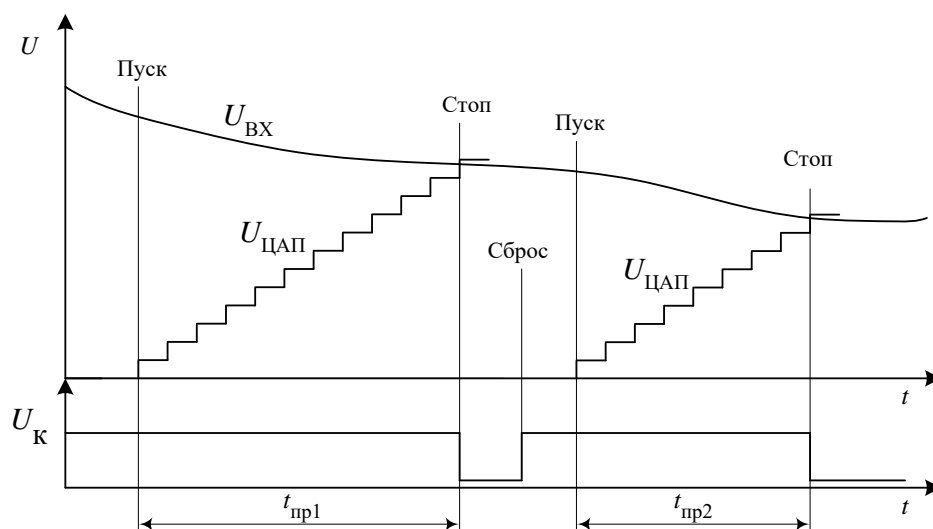


Рис. 6.20. Графики работы АЦП последовательного счета

Когда выходное напряжение ЦАП сравнивается с входным напряжением, произойдет переключение компаратора и по его выходному сигналу «СТОП» закрывается логический элемент «И». В результате импульсы от генератора перестанут поступать на вход счетчика. Выходной код счетчика, соответствующий равенству  $U_{ВХ}=U_{ЦАП}$ , снимается с выходного регистра счетчика.

Из этих графиков видно, что время преобразования переменное и зависит от уровня входного сигнала. При числе двоичных разрядов счетчика, равном  $n$ , и периоде следования счетных импульсов  $T$  максимальное время преобразования можно определить по формуле:

$$T_{пр} = (2^n) \cdot T.$$

Так, например, при  $n=10$  разрядов и  $T=1$  мкс (т.е. при тактовой частоте 1 МГц) максимальное время преобразования равно  $T_{пр} = (2^{10}) \cdot 1 = 1024$  мкс  $\approx 1$  мс, что обеспечивает максимальную частоту преобразования около 1 кГц.

### АЦП последовательного приближения

Структурная схема АЦП последовательного приближения приведена на рис. 6.21. Их также называют АЦП с поразрядным уравниванием. По сравнению со схемой АЦП последовательного счета в ней сделано одно существенное изменение – вместо счетчика введен регистр последовательного приближения (РПП). Это изменило алгоритм уравнивания и сократило время преобразования.

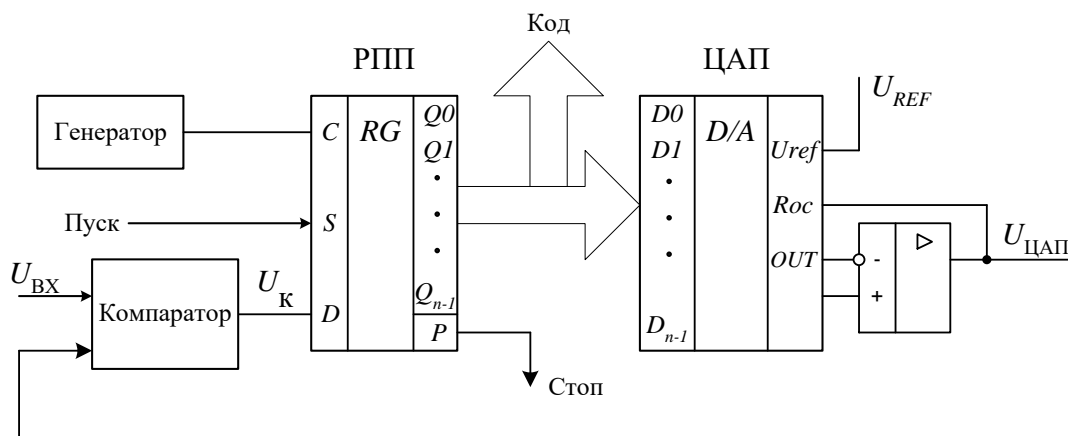


Рис. 6.21. АЦП последовательного приближения

В основе работы АЦП с регистром последовательного приближения лежит процедура последовательного сравнения преобразуемого напряжения  $U_{ВХ}$  с набором фиксированных значений напряжений, равных  $1/2, 1/4, 1/8, \dots, 1/2^n$  от возможного максимального его значения  $U_{\max} = U_{REF}$ . Если число разрядов АЦП и соответственно РПП равно 10, то самое младшее фиксированное значение равно  $1/2^{10} = 1/1024$ . Процесс преобразования начинается подачей сигнала «Пуск». При этом в регистр записывается двоичный код 1000...00 с единицей в старшем разряде, что соответствует установлению на выходе ЦАП напряжения  $U_{ЦАП} = 1/2 U_{REF}$  (рис. 6.22). Это напряжение сравнивается компаратором с входным напряжением. Если  $U_{ВХ} > U_{ЦАП}$ , то логическая единица остается в регистре, а если  $U_{ВХ} < U_{ЦАП}$ , то в регистр записывается ноль. Эта процедура на примере 10-ти разрядного АЦП показана в табл. 6.3. На следующем такте записывается единица во второй разряд регистра, что соответствует увеличению выходного напряжения ЦАП на  $1/4 U_{REF}$ . Вновь производится сравнение напряжений и так процесс

повторяется до тех пор, пока  $U_{\text{ЦАП}}$  максимально не приблизится к входному напряжению  $U_{\text{ВХ}}$ .

Таким образом, для  $n$ -разрядного АЦП процесс преобразования выполняется за  $n$  последовательных шагов приближения (итераций) вместо  $2n$  при использовании последовательного счета и получается существенный выигрыш в быстродействии.

Время преобразования АЦП последовательного приближения определяется выражением  $T_{\text{пр}} = T \cdot (n + 1)$ , где  $T$  – период следования тактовых импульсов,  $n$  – число разрядов,  $n+1$  – для формирования сигнала  $P$  (конец преобразования).

Если сигнал с выхода  $P$  (Стоп) подать на вход  $S$  (Пуск), то АЦП переходит в циклический режим работы.

Для рассмотренных типов АЦП необходимо выполнение следующего условия. На время преобразования  $T_{\text{пр}}$  входной сигнал должен оставаться неизменным, т.е. необходимо устройство, запоминающее входной сигнал на время преобразования. Эту функцию выполняют устройства выборки и хранения (УВХ), которые являются аналоговыми запоминающими устройствами.

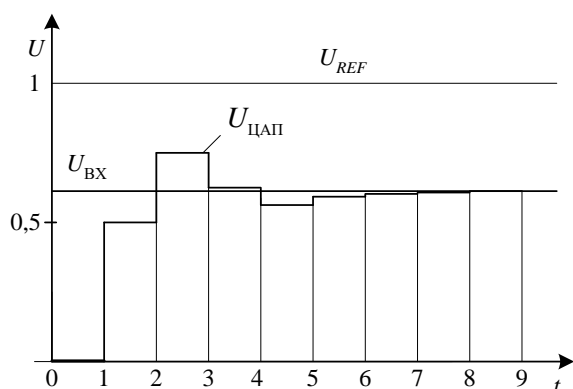


Рис. 6.22. Процесс преобразования АЦП последовательного приближения

Таблица 6.3

Процедура преобразования АЦП

$N$	Код	Результат	$U_{\text{К}}$
1	1000000000	$U_{\text{ВХ}} > U_{\text{ЦАП}}$	1
2	1100000000	$U_{\text{ВХ}} < U_{\text{ЦАП}}$	0
3	1010000000	$U_{\text{ВХ}} < U_{\text{ЦАП}}$	0
4	1001000000	$U_{\text{ВХ}} > U_{\text{ЦАП}}$	1
5	1001100000	$U_{\text{ВХ}} > U_{\text{ЦАП}}$	1
6	1001110000	$U_{\text{ВХ}} > U_{\text{ЦАП}}$	1
7	1001111000	$U_{\text{ВХ}} > U_{\text{ЦАП}}$	1
...	...	...	...

На рис. 6.23, а показана функциональная схема УВХ. Основным его элементом является конденсатор  $C$ , который выполняет функцию запоминающего устройства. При подаче управляющего сигнала  $U_{упр}$  ключ  $K1$  замыкается, а ключ  $K2$  – размыкается. Входное напряжение  $U_{вх}$  подается на конденсатор, который заряжается до величины входного сигнала. Далее управляющий сигнал снимается, и ключи переводятся в положение, показанное на рисунке. Таким образом, на выходе устанавливается фиксированное напряжение, которое не меняется на все время преобразования.

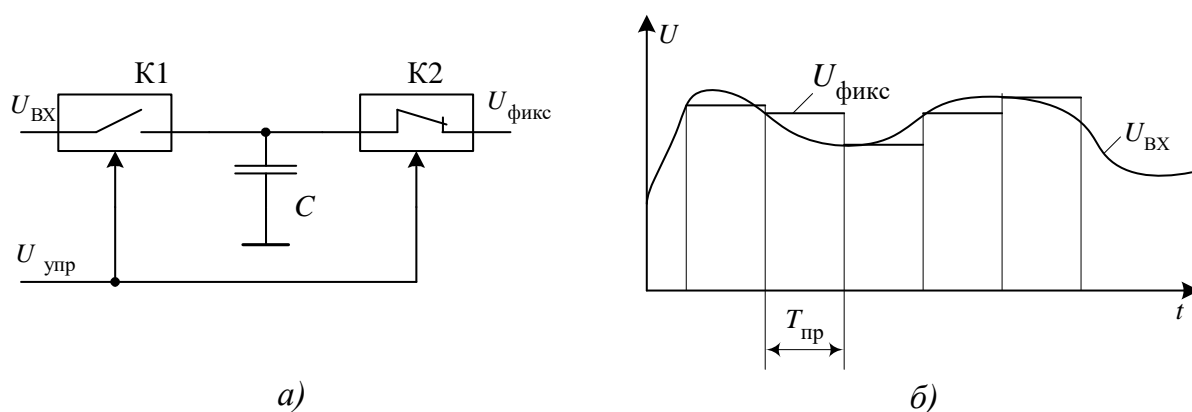


Рис. 6.23. Устройство выборки и хранения

Для получения следующего значения кода операция повторяется. На рис. 6.23, б показаны графики входного и выходного фиксированного сигналов УВХ.

В качестве ключа могут быть использованы схемы на биполярных или полевых транзисторах.

Одним из основных параметров УВХ является время выборки, т.е. время, в течение которого образуется заряд на конденсаторе. Это время зависит прямо пропорционально от емкости конденсатора, и при типовой емкости  $C = 1нФ$  время выборки составляет 5 мкс.

В режиме хранения основным параметром УВХ является скорость изменения выходного напряжения, которая определяется скоростью разряда конденсатора. Скорость разряда в свою очередь определяется токами утечки ключа и конденсатора. Поэтому к конденсатору предъявляются повышенные требования. Для

сохранения уровня заряда на все время преобразования конденсатор должен иметь как можно меньший ток утечки.

Выпускаемые промышленностью устройства выборки и хранения К1100СК2, К1100СК3 имеют время выборки соответственно 5 мкс и 4 мкс, и скорость изменения напряжения в режиме хранения – 0,2 мВ/мкс и 0,1 мВ/мкс.

Основной недостаток УВХ – большое время преобразования, вследствие чего возможны потери информации в быстро изменяющихся процессах.

### ***АЦП параллельного считывания***

Структурная схема АЦП параллельного считывания приведена на рис. 6.24. Устройство содержит  $S = 2^{n-1}$  компараторов  $K_i$ , на объединенные входы которых подается входной сигнал. На вторые входы компараторов подаются напряжения, которые задаются с помощью резистивного делителя в соответствии с используемой шкалой квантования. При подаче на входы компараторов сигнала  $U_{вх}$  на их выходах получим квантованный сигнал, представленный в унитарном коде.

Для преобразования унитарного кода в двоичный (или двоично-десятичный) используют преобразователь кода (ПК). При работе в двоичном коде все резисторы делителя имеют одинаковые сопротивления  $R$ . Время преобразования такого преобразователя составляет один такт, т. е.  $T_{пр} = T$ . Получение двоичного кода осуществляется подачей импульса «Запись» на вход С регистра. Параллельные преобразователи являются в настоящее время самыми быстрыми и могут работать с частотой дискретизации свыше 100 МГц. Для получения более широкой полосы пропускания компараторы обычно делают стробируемыми.

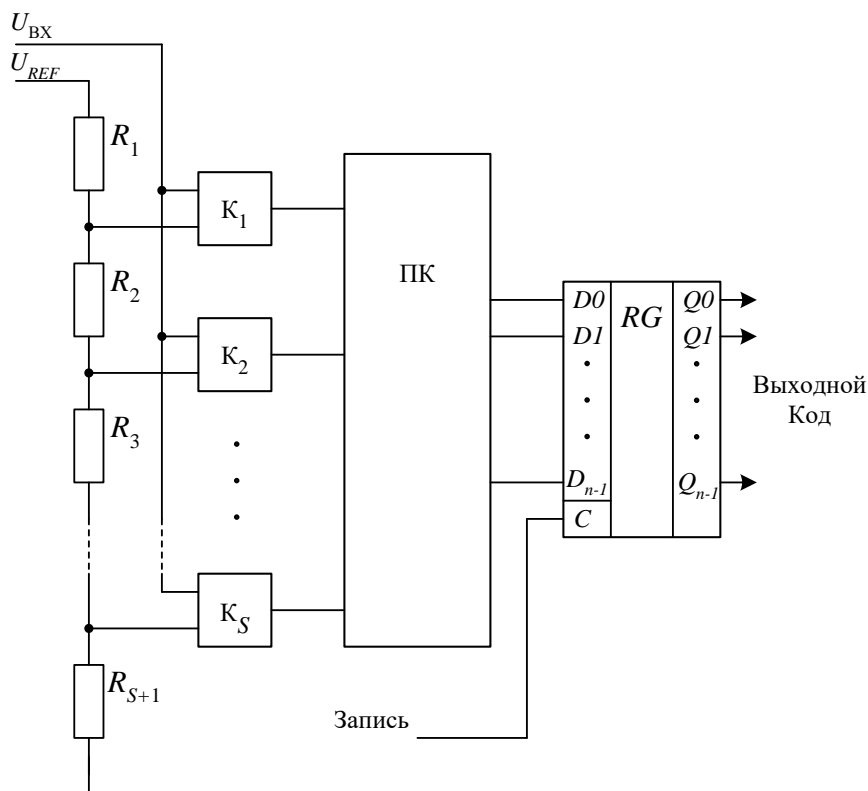


Рис. 6.24. АЦП параллельного считывания

Делитель опорного напряжения представляет собой набор низкоомных резисторов с сопротивлением около 1 Ом. Компараторы для увеличения быстродействия работают в режиме переключателя тока. Типовая задержка срабатывания компараторов около 7нс и определяется только быстродействием используемой элементной базы.

Основным недостатком таких АЦП является малое число разрядов. Это связано со значительными аппаратными затратами. Так для построения 8-разрядного АЦП необходимо 255 компараторов. Из-за применения низкоомной матрицы резисторов в схеме формируются большие токи и, следовательно, весь преобразователь потребляет большую мощность (до 2,5 Вт), что ставит проблему отвода тепла от микросхемы.

### ***Параллельно-последовательный АЦП***

Структурная схема параллельно-последовательного АЦП приведена на рис. 6.25. Такой АЦП работает в несколько тактов. В первом такте АЦП преобразует входное напряжения  $U_{BX}$  в цифровой код старших разрядов (Код1). Затем во втором такте эти разряды

преобразуются с помощью ЦАП в напряжение, которое вычитается из входного сигнала в вычитающем устройстве ВУ. В третьем такте АЦП2 преобразует полученную разность в код младших разрядов (Код2) входного напряжения  $U_{вх}$ .

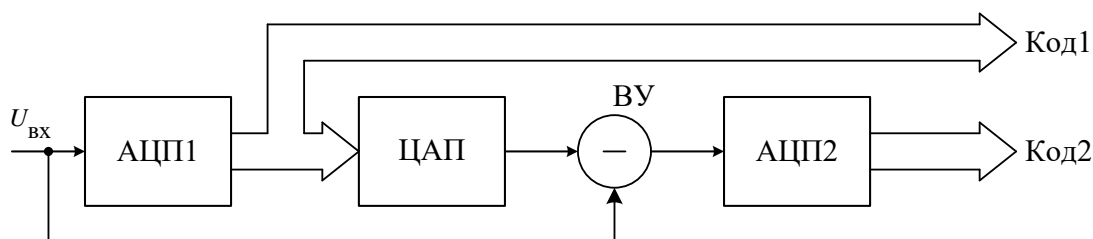


Рис. 6.25. Параллельно-последовательный АЦП

Такие преобразователи характеризуется меньшим быстродействием по сравнению с параллельными, но имеют меньшее число компараторов. Так, например для 6-ти разрядного параллельного АЦП необходимо 64 компаратора, а для параллельно-последовательного АЦП – всего 16.

Количество каскадов в таких АЦП может быть увеличено, поэтому они часто называются многокаскадными или конвейерными. Выходной код таких АЦП представляет собой сумму кодов  $N=N1+N2+N3+ \dots$ , вырабатываемых отдельными каскадами.

### ***6.2.3. АЦП средних значений напряжения***

Интегрирующие АЦП можно разделить на следующие основные виды:

- с импульсным преобразованием;
- с частотно-импульсным преобразованием;
- со статистическим усреднением.

Наибольшее распространение получили первые две группы АЦП.

#### ***АЦП с двойным интегрированием***

Аналого-цифровой преобразователь с двойным интегрированием относится к интегрирующим АЦП с импульсным преобразованием. Он отличается повышенной точностью и помехозащищенностью.

Любой сигнал кроме полезной информационной составляющей содержит составляющие помех, таких как наводки от питающего напряжения, собственные шумы элементов и т.д.

При непосредственном преобразовании выборка сигнала происходит в дискретные моменты времени и поэтому выходной код пропорционален мгновенным значениям, а не информационным. Если в процессе преобразования сигнал проинтегрировать, то результат будет пропорционален информационной составляющей сигнала.

Результат преобразования АЦП двойного интегрирования представляется цифровым кодом, эквивалентным среднему значению напряжения на аналоговом входе, преобразуемому за фиксированный интервал времени в соответствии с выражением

$$\int_0^{T_0} U_{ВХ}(t) dt = \int_0^{T_x} U_{REF} dx,$$

где  $T_0$  – фиксированный интервал интегрирования входного сигнала  $U_{ВХ}$ ,  $T_x$  – интервал интегрирования  $U_{REF}$ .

Скорость нарастания выходного напряжения интегратора зависит от величины входного сигнала. Чем больше входной сигнал, тем больше скорость нарастания выходного. Графики, иллюстрирующие работу АЦП для трех значений входного сигнала, приведены на рис. 6.26, а его структурная схема показана на рис. 6.27.

Работу этой схемы можно разделить на три такта.

1. Входной сигнал  $U_{ВХ}$  поступает на вход интегратора, и его выходное напряжение увеличивается с постоянной скоростью, пропорциональной величине  $U_{ВХ}$ .

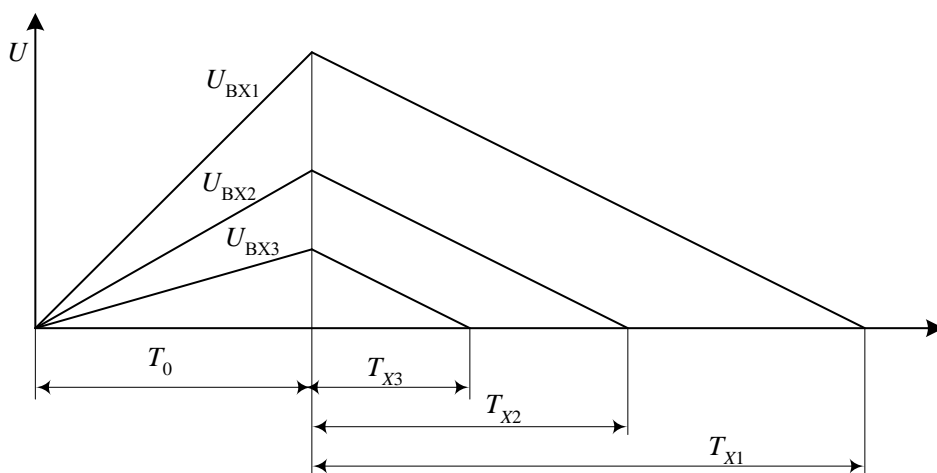


Рис. 6.26. Процесс преобразования интегрирующего АЦП



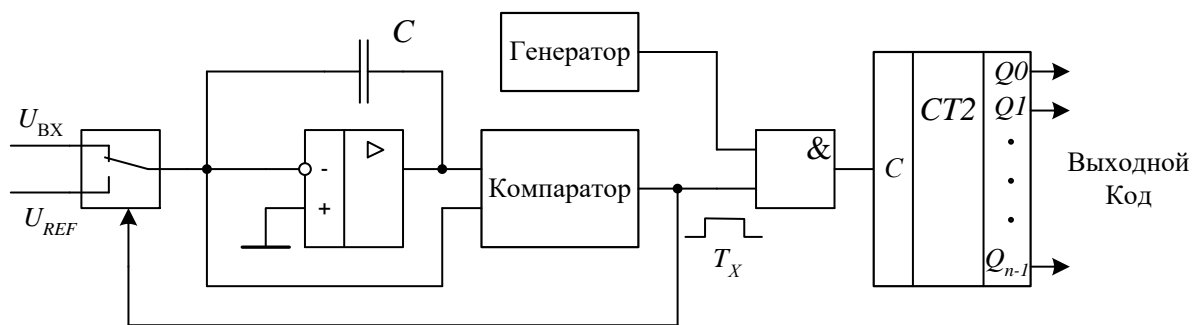


Рис. 6.27. АЦП двойного интегрирования

2. Через фиксированный интервал времени  $T_0$  компаратор переключает ключ и на вход интегратора подается опорное напряжение  $U_{REF}$  противоположной полярности и выходное напряжение интегратора начинает уменьшаться с фиксированной скоростью, определяемой величиной  $U_{REF}$ .

3. При достижении выходного напряжения интегратора нулевого значения компаратор отключает опорное напряжение от входа интегратора и включает цепи автокомпенсации нуля интегратора.

Во втором такте во время разряда интегратора на выходе компаратора установлен уровень логической единицы, которая открывает элемент «И». Импульсы с генератора поступают на вход С счетчика, который подсчитывает их в течение интервала времени  $T_x$  и формирует выходной код.

Как видно из графика процесса преобразования (см. рис. 6.26) величина интервала  $T_x$  зависит от значения входного сигнала  $U_{BX}$ . Таким образом, выходной код счетчика также определяется величиной входного напряжения.

К недостаткам таких интегрирующих АЦП относится, прежде всего, сравнительно невысокое быстродействие. Кроме этого, при перегрузке АЦП большим входным сигналом происходит перезаряд интегрирующего конденсатора  $C$ , поэтому после снятия перегрузки в течение нескольких циклов АЦП будет работать с большой погрешностью.

Другим типом интегрирующих АЦП являются АЦП с частотно-импульсным преобразованием, принцип работы которых основан на предварительном преобразовании входного напряжения в пропорциональную ему частоту следования импульсов, которая затем

измеряется за фиксированный интервал времени. После подсчета числа импульсов результат выдается в виде цифрового эквивалента входного напряжения.

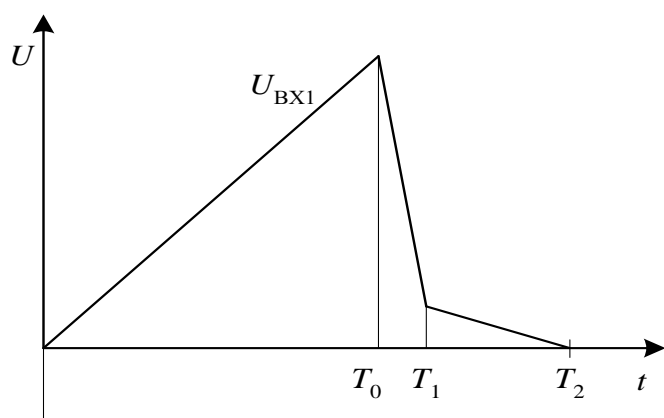


Рис. 6.28. График разряда конденсатора

интегрирования и конвейерные АЦП.

АЦП с сигма-дельта модулятором выполняет два процесса: интегрирование за малое время и сложение результатов интегрирования. Выходным сигналом такого модулятора является частота импульсов. Схема такого АЦП во многом совпадает с АЦП с частотно-импульсным преобразованием. В этом АЦП также производится компенсация заряда, накопленного в интеграторе, а вместо импульсного генератора используется одноразрядный ЦАП с компаратором на входе.

АЦП быстрого интегрирования представляет собой интегрирующий АЦП с время-импульсным преобразованием, в котором разряд интегратора выполняется ускоренным образом. Вначале разряд идет от большого опорного напряжения  $U_{REF}$  (с большой скоростью) до некоторого значения  $E$ , а затем от малого  $U_{REF} - E$  — с малой скоростью (рис. 6.28). Такой процесс разряда похож на работу скоростного лифта. Между этажами он движется быстро, а при подходе к остановке резко замедляет скорость. В таких АЦП сокращается время разряда интегратора и увеличивается точность сравнения в конце разряда.

Конвейерный АЦП представляет собой структуру, подобную параллельно-последовательному АЦП, но с увеличенным числом каскадов. Для хранения мгновенных значений напряжения в каждом каскаде используются устройства выборки и хранения информации.

В последнее время в связи с широким применением АЦП в различных системах сбора и обработки информации появились новые типы преобразователей с улучшенными характеристиками. К их числу относятся: АЦП с сигма-дельта ( $\Sigma/\Delta$ ) модулятором, АЦП быстрого

Вычитающие устройства образуют разность напряжений, подлежащую преобразованию в следующем каскаде. Все АЦП параллельные и имеют небольшое число разрядов (обычно не больше четырех).

#### 6.2.4. Интегральные микросхемы АЦП

В последнее время многие фирмы организовали производство серийных интегральных микросхем АЦП, основанных на различных принципах и предназначенных для работы в устройствах сопряжения датчиков аналоговых сигналов с ЭВМ и микропроцессорами, в различных измерительных устройствах, мультиметрах, в медицинской аппаратуре, цифровых термометрах и др.

Наиболее крупными производителями АЦП в России являются заводы «Микрон» и «Сапфир», а за рубежом — компании Analog Devices (США), Micro power (США), Philips, Maxim, Sony и др.

Прежде всего, необходимо отметить, что резко увеличилась разрешающая способность АЦП. Ряд фирм выпускает АЦП с разрешением до 24 двоичных разрядов. Однако наиболее распространенными являются АЦП с разрядностью 8, 10, 12 и 16 разрядов. Повысилось быстродействие серийных микросхем АЦП. Налажено производство АЦП с максимальной частотой преобразования 20...50МГц. Такие АЦП используются при преобразовании видеосигналов в цифровую форму в цифровых телевизорах, видеомагнитофонах, видеомониторах и других устройствах.

В качестве примера рассмотрим АЦП AD7825 компании Analog Devices. На рис. 6.29 показано ее графическое обозначение. В таблице 6.4. приведено описание выводов микросхемы.

Группа микросхем AD7822, AD7825 и AD7829 являются высокоскоростными, 1-,4- и 8- канальными, микропроцессорно-совместимыми, 8-битными аналого-цифровыми преобразователями с

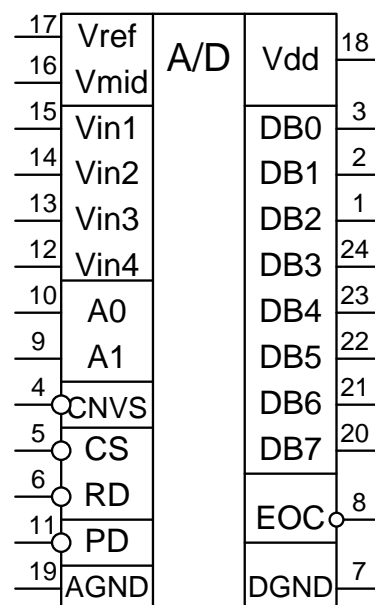


Рис.6.29. АЦП AD7825

максимальной производительностью до 2 миллионов выборок в секунду.

Таблица 6.4. Назначение выводов АЦП AD7825

Вывод	Назначение вывода
$V_{IN1} \dots V_{IN4}$	Аналоговые входные каналы. AD7822 имеет один входной канал; AD7825 и AD7829 имеют четыре и восемь аналоговых входных каналов соответственно. Входы имеют входной диапазон 2,5 В и 2 В (в зависимости от напряжения питания $V_{dd}$ ).
$V_{dd}$	Положительное напряжение питания, 3 В $\pm$ 10% и 5 В $\pm$ 10%.
$AGND$	Аналоговая земля.
$DGND$	Цифровая земля.
$CNVS$	Логический входной сигнал начала преобразования.
$EOC$	Логический выход. Сигнал окончания преобразования указывает на завершение преобразования.
$CS$	Логический входной сигнал выбора микросхемы
$PD$	Логический ввод отключения питания
$RD$	Логический входной сигнал считывания данных.
$A0, A2$	Входные данные адреса канала.
$DB0 \dots DB7$	Линии вывода данных.
$V_{ref}$	Аналоговый вход и выход. К этому выводу можно подключить внешнее опорное напряжение.
$V_{mid}$	Используется для центрирования аналоговых входов в диапазоне от $AGND$ до $V_{dd}$

Все микросхемы содержат внутренние источники опорного напряжения 2.5В (2%-точности), усилитель выборок и хранения, 420 наносекундный 8-битный АЦП и высокоскоростной параллельный интерфейс. Напряжение питания преобразователей 3В  $\pm$  10% и 5В  $\pm$  10%. Все преобразователи совмещают функцию запуска преобразования и режима «Выкл» от одного вывода  $CNVS$ . Это обеспечивает автоматический переход в режим «Выкл» по окончании цикла преобразования. Логический уровень на выводе  $CNVS$  изменяется после завершения цикла преобразования. Когда сигнал  $EOC$  (конец преобразования) переключается с высокого на низкий уровень АЦП выключается. AD7822 и AD7825 кроме того имеют отдельные выводы выключения преобразователей.

Применённый параллельный интерфейс обеспечивает простые процедуры передачи данных в микропроцессор или цифровой сигнальный процессор. Используя только логику декодирования

адреса, преобразователи просто обращаются в адресное пространство микропроцессора. Импульс *EOK* позволяет АЦП работать в режиме ожидания.

Важнейшие достоинства:

- быстрое время преобразования 420 нс ускоряет процессы в системах реального времени;

- регулировка шкалы входных сигналов с помощью вывода *Vmid* позволяет снизить требования к операционным усилителям с однополярным питанием и учесть любые смещения в системе;

- широкая полоса усилителя выборок и хранения позволяет преобразовывать сигналы с амплитудой полной шкалы до частоты 10 МГц, что обеспечивает прекрасную возможность использования данных преобразователей в высокоскоростных приложениях;

- выбор канала преобразования без обращений к памяти микросхем.

Отличительные особенности:

- 8-битные АЦП с временем преобразования 420 нс;

- 1, 4 и 8 униполярных аналоговых входа с регулировкой смещения;

- внутренние выборки-хранение;

- шумовые характеристики гарантированы до входной частоты 10 МГц;

- внутренний источник опорного напряжения (2,5В)

- автоматический режим «Выкл» по окончании цикла преобразования;

- широкий диапазон питающих напряжений 3В ± 10% и 5В ± 10%;

- диапазон входных сигналов:

- 0В до 2В при напряжении питания 3В;

- 0В до 2.5В при напряжении питания 5В;

- Гибкий параллельный интерфейс с импульсом прерывания режима ожидания.

### ***6.2.5. Применение аналого-цифровых преобразователей***

АЦП применяются для преобразования непрерывного сигнала изменения любой физической величины в цифровой код.

Задача измерения физической величины в нужном формате цифрового кода состоит из четырех этапов.

1. Преобразование физической величины в электрический сигнал, пропорциональный изменению физической величины.

2. Передача этого сигнала от объекта управления к системе управления.

3. Нормирование величины электрического сигнала.

4. Коммутация нескольких электрических сигналов на входе системы управления без потери точности измерения.

На первом этапе для преобразования физической величины используются первичные преобразователи различных типов.

Для измерения перемещения используются резисторы, синусно-косинусные вращающиеся трансформаторы (СКВТ), фотооптические датчики, индуктивные датчики; измерение скорости осуществляется тахогенераторами, СКВТ, фотооптические датчики; усилие измеряют датчиками тока (шунты и трансформаторы тока), силомоментными датчиками на основе тензорезисторов; давление – датчиками манометрическими, механотроны.

На выходе первичного преобразователя формируется электрический сигнал и его необходимо передать от объекта управления в систему управления.

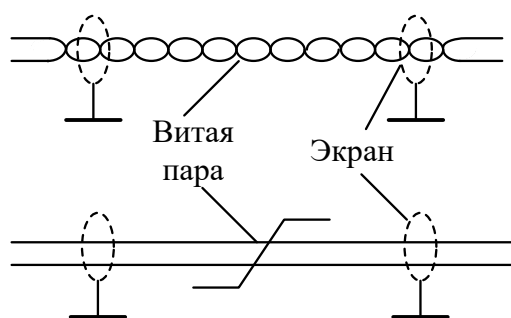


Рис. 6.30. Витая пара в экране

Основной проблемой при передаче сигнала является повышение его помехоустойчивости, так как на передаваемый сигнал накладываются различные шумы, наводятся переменные токи промышленных частот и т.д.

Для защиты сигнала применяют экранирование проводников, витые пары (рис. 6.30), используют различные модуляторы и демодуляторы сигнала.

Также способствует повышению помехоустойчивости использование:

- минимальной длины линии;
- максимального диаметра проводника;
- максимальной амплитуды передаваемого сигнала;
- минимальной величины тока в линии.

Электрический сигнал с выхода первичного преобразователя, как правило, это напряжение или ток, может иметь самый разный диапазон. Например, величина напряжения с тахогенератора может меняться от нуля до десятков и даже сотен вольт, а напряжение с силомоментного датчика на основе тензорезисторов меняется в диапазоне нескольких милливольт. Поэтому весь диапазон изменения значений электрических сигналов необходимо нормировать, т.е. приводить к определенным пределам изменения.

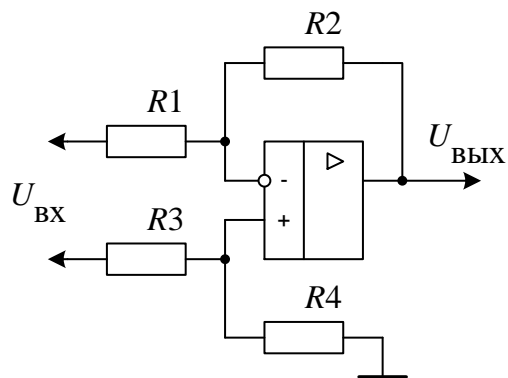


Рис. 6.31. Нормирующий усилитель

Для напряжения используются в основном следующие пределы: для постоянного  $0 \dots 1,024\text{В}$ , и  $0 \dots 10,24\text{В}$ ; для переменного –  $0 \dots 2\text{В}$ .

Для тока –  $0 \dots 3\text{мА}$ ;  $0 \dots 20\text{мА}$ ;  $4 \dots 20\text{мА}$ .

Для приведения к этим диапазонам применяются масштабирующие (или нормирующие) усилители (рис. 6.31). Усилитель обеспечивает прием, масштабирование и «привязку» к общему проводу входного сигнала от объекта управления. Для этого усилителя  $R1 = R3$ ,  $R2 = R4$ . Коэффициент усиления (масштабирования) определяется выражением  $k = \frac{R2}{R1}$ . Максимальное входное напряжение может быть до  $10\text{В}$ .

Вариант высоковольтного нормирующего усилителя показан на рис. 6.32. Для этого усилителя  $R1 = R2 = R3 = R4 = R5$ ,  $R6 = R7$ ,  $R8 = R9$ ,  $k = \frac{R8}{R6}$ .

Входное напряжение может быть до  $1\text{кВ}$ .

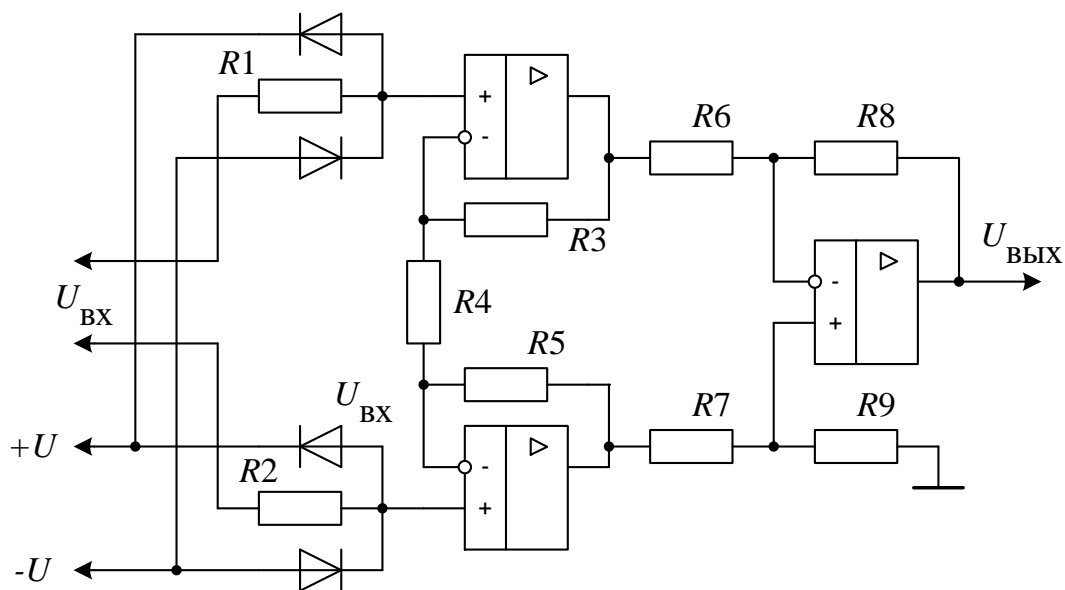


Рис. 6.32. Высоковольтный нормирующий усилитель

Для передачи данных от нескольких источников используются аналоговые коммутаторы – мультиплексоры совместно с устройствами выборки-хранения. На входы коммутатора (рис. 6.33) подаются сигналы от различных источников. Подачей соответствующего кода на входы выбора номера канала, выбранный входной сигнал подается на выход коммутатора. УВХ запоминает этот сигнал на конденсаторе, который заряжается до величины входного сигнала.

Напряжение с выхода УВХ подается на аналого-цифровой преобразователь, который выполняет преобразование выбранного сигнала. Преобразование входных сигналов в цифровой код состоит из нескольких фаз.

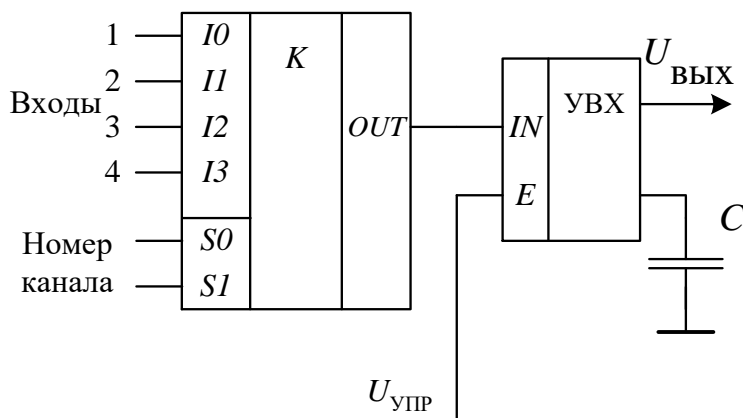


Рис. 6.33. Применение коммутатора



Например, для двух сигналов процесс преобразования представлен на рис. 6.34.

1 фаза. Включается канал №1, производится заряд конденсатора.

2 фаза. Вход УВХ закрывается, на его выходе установилось постоянное напряжение и выполняется аналого-цифровое преобразование.

3 фаза. Включается канал №2, осуществляется перезаряд конденсатора до уровня второго сигнала.

4 фаза. УВХ закрывается и выполняется аналого-цифровое преобразование второго сигнала.

В качестве коммутаторов можно применять микросхемы серии К590КН1...9, УВХ – серия К1100СК1...5.

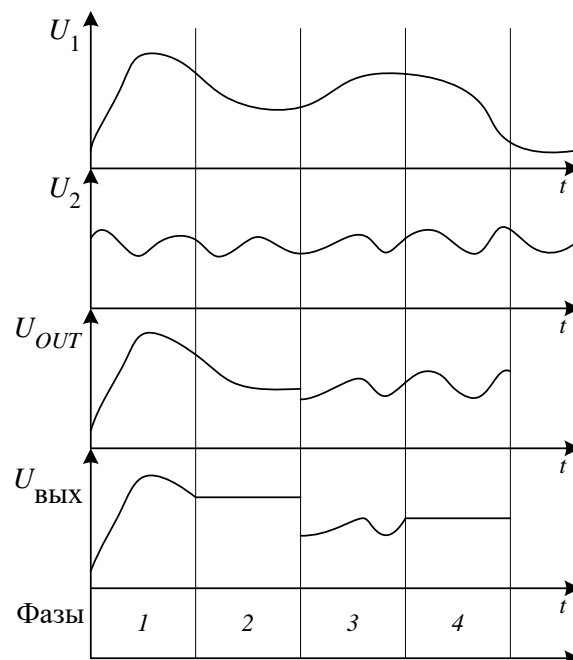


Рис. 6.34. Процесс преобразования

### Контрольные вопросы

1. Объясните принцип работы ЦАП с суммированием токов.
2. Как в ЦАП осуществляется преобразование тока в напряжение?
3. Какие операции необходимо выполнить при аналого-цифровом преобразовании?
4. Перечислите способы аналого-цифрового преобразования.
5. Какой АЦП является самым быстродействующим и почему?
6. Сколько разрядов должен иметь ЦАП для получения точности установления выходного напряжения 0,1%?
7. Почему интегрирующий АЦП отличается повышенной точностью и помехозащищенностью?

8. Как формируется выходное напряжение управляемого ЦАП?
9. Какие области применения генераторов сигналов специальной формы?
10. Какое устройство составляет основу генераторов сигналов специальной формы?
11. Каким образом осуществляется гальваническая развязка в устройствах аналогового вывода?
12. Какие задачи необходимо решить при передаче аналоговых сигналов от объекта управления?
13. Какие устройства применяются для преобразования физической величины в электрический сигнал?
14. С какой целью используют нормирующие усилители?
15. Как осуществляется передача данных от нескольких источников аналоговых сигналов?

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Перспективы и направления развития электроники зависят в первую очередь от научных достижений в области физики, химии, математики и техники полупроводников. Электроника, связанная с нарастающими информационными потоками, давно уже перешла в область микроэлектроники, где достигнуты впечатляющие успехи благодаря миниатюризации, снижению потребления энергии, повышению быстродействия, расширению функциональных возможностей электронных средств.

В настоящее время наблюдается переход от микроструктур к наноструктурам, что сулит дальнейшее увеличение степени интеграции полупроводниковых приборов и улучшение энергетических параметров базовых элементов электроники, в первую очередь транзисторов, а на их основе – всех других функциональных узлов электроники. По мнению ведущих ученых, наноструктуры будут основной элементной базой в ближайшие 30 – 50 лет. Следует при этом заметить, что технология изготовления наноструктурных электронных чипов существенно сложнее технологии изготовления микроструктурных чипов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аналоговая и цифровая электроника (Полный курс): Учебник для вузов / Ю.Ф. Опадчий, О.П. Глудкин, А.И. Гуров; Под ред. О.П. Глудкина. – М.: Горячая линия – Телеком, 2002. – 768 с., ил. ISBN 5-93517-002-7.

2. Борисов В.Г. Юный радиолобитель. Массовая радиобиблиотека Выпуск. 1101. Москва, «Радио и связь», 1985. <https://e-libra.ru/read/499405-yunyu-radiolyubitel-7-izd.html>

3. Жеребцов, И.П. Основы электроники / И.П. Жеребцов. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.: ил.

4. Основы электроники, радиотехники и связи: учебное пособие для вузов /А.Д. Гуменюк, В.И. Журавлев, Ю.Ю. Мартюшев и др.; под ред. Г.Д. Петрухина – М.: Горячая линия – Телеком, 2008. – 480с.

5. Павлов В.Н., Ногин В.Н. Схемотехника аналоговых электронных устройств. М., Радио и связь, 320 стр., 2003г., (учебник для ВУЗ-ов).

6. Полупроводниковые приборы: диоды, тиристоры, оптоэлектронные приборы: справочник / А.В. Баюков, А.Б. Гитцевич, А.А. Зайцев и др.; под общ. ред. Н.Н. Горюнова. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 744 с.: ил.

7. Прянишников В.А. Электроника: Курс лекций. – 2-е изд. – СПб.: КОРОНА принт, 2000. – 416с., ил. ISBN 5-7931-0018-0.

8. Режимы работы усилителей (классификация усилителей) Автор Микушин А. В. All rights reserved. 2001 ... 2020 <https://digteh.ru/Sxemoteh/RejRab//>

9. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. Пер.с.англ. Изд. 6-е, М.: Мир, 2001. ISBN 5-09-003395-5(рус).

10.Что такое P–N переход. Режим доступа <https://zen.yandex.ru/media/energofiksik/chto-takoe-pn-perehod-obiasniaem-prostymi-slovami-5c01768bbf228500aa567381> свободный.

11.Щука, А.А. Нанoeлектроника /А.А. Щука. – М.: Физматкнига, 2007. – 464 с.: ил.

12.Электронная библиотека УО «ГГЭК им. И. Счастлиого». <https://book.ggpek.by/promel/teor/1-2-poluprovodnikovye-diody>

*Учебное издание*

МИШУЛИН Юрий Евгеньевич

АНАЛОГОВАЯ СХЕМОТЕХНИКА

Учебное пособие

*Издается в авторской редакции*

Подписано в печать 22.06.21.

Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 12,32. Тираж 50 экз.

Заказ

Издательство

Владимирского государственного университета  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.

600000, Владимир, ул. Горького, 87.