

### 3. Транзисторы

Транзистор (TRANSISTOR) получил свое название от сочетания английских слов TRANSfer resISTOR – управляемое сопротивление. Это связано с тем, что транзистор изменяет своё внутреннее сопротивление под воздействием управляющего сигнала. Транзисторы служат для усиления, генерации и переключения сигналов, построения логических схем и триггеров различных типов, на основе которых строятся процессоры, элементы памяти и различные контроллеры информационно-вычислительных систем.

В зависимости от типа носителей зарядов и вида управляющего сигнала различают полевые (униполярные) транзисторы, ток в которых создаётся одним типом зарядов (только электронами или только дырками) и изменяется под действием электрического поля, и биполярные, ток в которых создаётся одновременным перемещением и электронов, и дырок, и зависит от управляющего тока.

Биполярным транзистором называется полупроводниковый прибор с двумя  $p$ - $n$ -переходами и тремя слоями с чередующейся проводимостью, ток в области базы которого создаётся неосновными носителями зарядов. Переходы делят структуру транзистора на три области. Область, через которую ток втекает в транзистор, называется *эмиттер* (Э), от латинского слова emissio – выпуск. Эмиттер выпускает заряды в среднюю область, которая называется *база* (Б). Прошедшие через базу заряды попадают (собираются) в третью область, которая называется *коллектор* (К), от латинского слова collectio – собирание. Из области коллектора ток из транзистора выходит во внешние цепи.

#### 3.1. Биполярные транзисторы

Полупроводниковые приборы, содержащие два взаимодействующих  $p$ - $n$  перехода, образованных тремя слоями полупроводников, с чередующимся типом электропроводности, обладающих усилительными свойствами и имеющих три вывода, называются биполярными транзисторами.

В зависимости от типа электропроводности слоев различают транзисторы  $p$ - $n$ - $p$  и  $n$ - $p$ - $n$  типов. На рис. 3.1а, и б показаны структуры транзисторов обоих типов и условные обозначения этих транзисторов. Конструктивное исполнение транзистора изображено на рис.3.1,в. Здесь Э – *эмиттер* – область транзистора, предназначенная для *инжекции* («впрыскивания») неосновных носителей заряда в базовую область; Б – *база* – область транзистора, предназначенная для *переноса* (транспортировки) инжектированных носителей к коллектору вследствие диффузии или дрейфа; К – *коллектор* – область транзистора, предназначенная для *экстракции* («вытягивания») неосновных носителей из базы за счет поля коллекторного перехода.

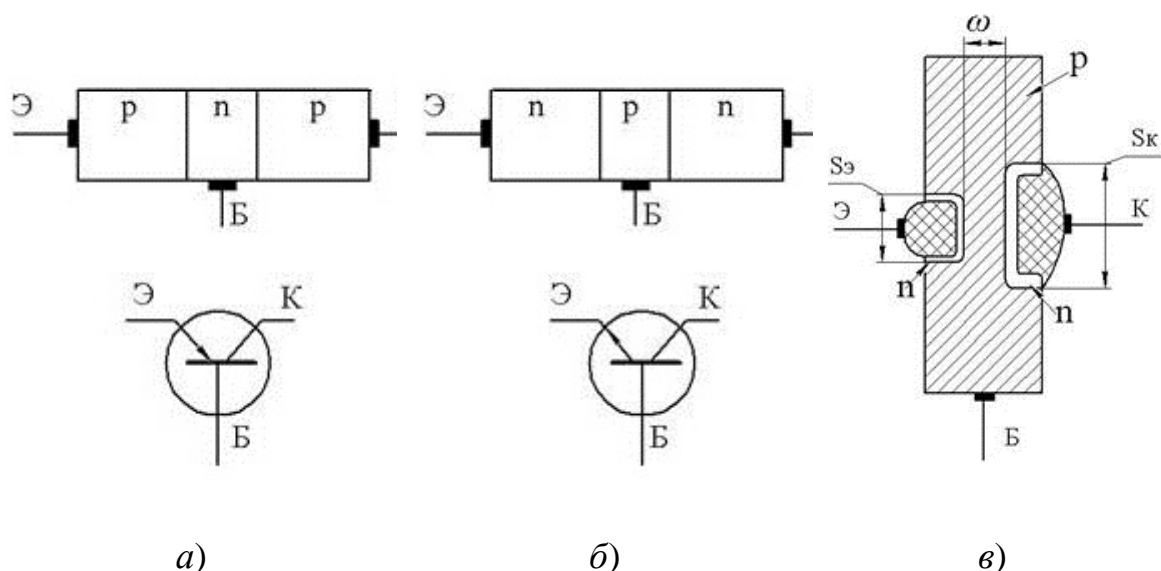


Рисунок 3.1 – Структуры транзисторов *p-n-p* (а) и *n-p-n* (б) -типов и их конструктивное исполнение (в)

В зависимости от *мощности*, рассеиваемой на коллекторе, различают транзисторы малой мощности (м.м.,  $P_{\text{к.мах}} < 0,3 \text{ Вт}$ ); средней мощности (с.м.,  $0,3 \text{ Вт} < P_{\text{к.мах}} < 1,5 \text{ Вт}$ ); большой мощности (б.м.,  $P_{\text{к.мах}} > 1,5 \text{ Вт}$ ).

В зависимости от *частоты* усиливаемого сигнала различают низкочастотные (НЧ,  $f_{\text{гр}} < 3 \text{ МГц}$ ); среднечастотные (СЧ,  $3 \text{ МГц} < f_{\text{гр}} < 30 \text{ МГц}$ ); высокочастотные (ВЧ,  $30 \text{ МГц} < f_{\text{гр}} < 300 \text{ МГц}$ ) и сверхвысокочастотные (СВЧ,  $f_{\text{гр}} > 300 \text{ МГц}$ ).

По виду используемого материала полупроводника различают транзисторы германиевые, кремниевые, на основе арсенида галлия.

В зависимости от того, какой электрод является общим для входной и выходной цепей, различают три схемы включения транзисторов (рис.3.2): с общей базой (ОБ), общим эмиттером (ОЭ) и общим коллектором (ОК).

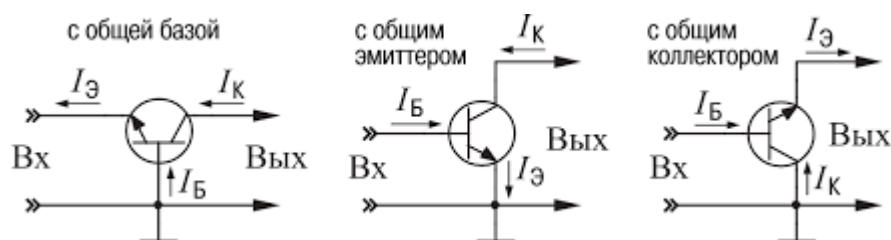


Рисунок 3.2 – Схемы включения транзистора

Принцип работы транзистора для всех схем включения одинаков. С приложением к эмиттерно-базовому переходу прямого напряжения  $U_{\text{э}}$  происходит инжекция дырок из эмиттера в базу и электронов из базы в эмиттер. Ввиду того, что эмиттер легирован намного сильнее базы, поток инжектированных дырок будет намного превышать поток электронов. Инжектированные в базу дырки будут перемещаться к коллектору. Возникающий при этом кол-

литорный ток  $I_K$  немного меньше тока эмиттера  $I_E$ . При подключении в цепь коллектора сопротивления нагрузки  $R_H$  относительно малое изменение напряжения база-эмиттер  $U_{бэ}$  будет вызывать большое изменение напряжения на сопротивлении нагрузки. Таким образом, транзистор осуществляет усиление по мощности.

Транзистор, также как и любой электронный прибор, характеризуется предельными режимами, превышение которых приводит к нарушению работы прибора и выходу его из строя. Максимально допустимые напряжения ограничиваются пробивными напряжениями соответствующих переходов; максимально допустимые мощность и ток ограничиваются максимально допустимой температурой коллекторного перехода, не приводящей к тепловому пробую.

Основными параметрами транзистора являются коэффициенты передачи токов:

-  $\alpha = I_K / I_E$  – коэффициент передачи эмиттерного тока в коллектор, равный от 0,9 до 0,99

-  $\beta = I_K / I_B$  – коэффициент передачи базового тока в коллектор (коэффициент усиления), принимающий значения от 10 до 1000.

Значение коэффициента  $\alpha = 0,99$  означает, что из 100 дырок, инжектированных через эмиттерный переход, 99 экстрагируются через коллекторный переход, и лишь одна прорекомбинирует с электронами в базе и даст вклад в базовый ток.

Вольт-амперные характеристики биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, показаны на рис.3.3 (а) – входные, (б) - выходные.

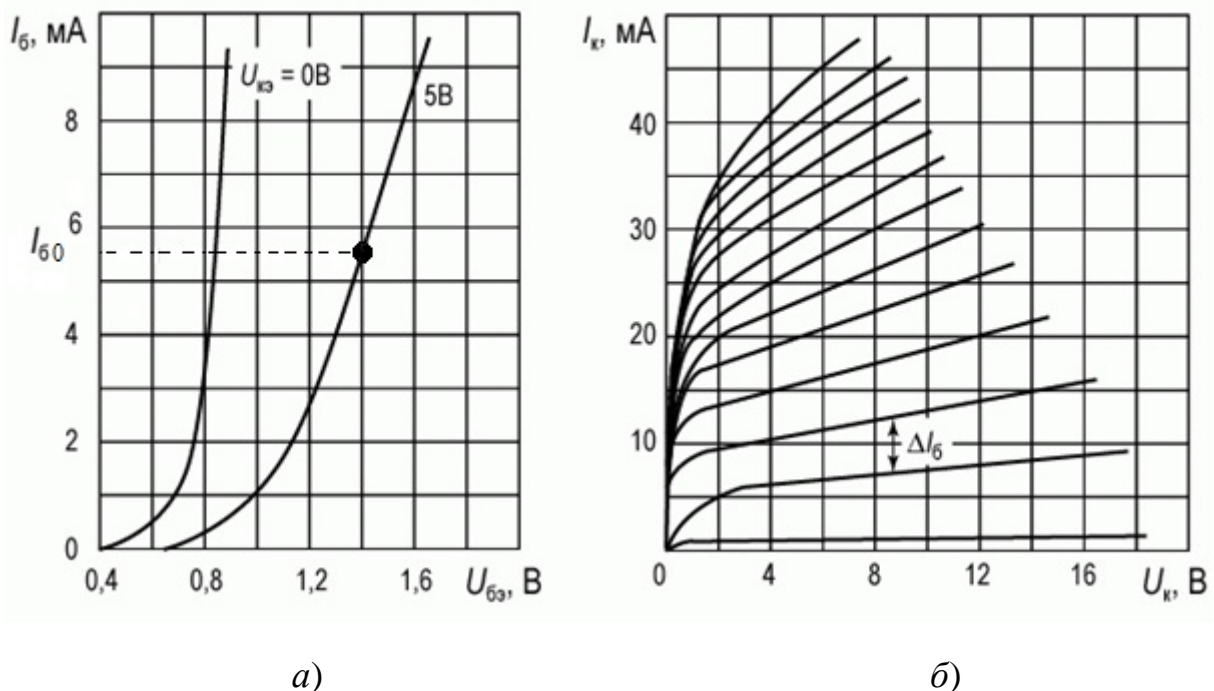


Рисунок 3.3 – Входная (а) и выходная (б) характеристики биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером

Для биполярного транзистора ток эмиттера равен сумме токов базы и коллектора, т.е.:

$$I_{\text{Э}} = I_{\text{б}} + I_{\text{к}}.$$

### 3. 2. МОП-транзисторы

Основой МОП (металл – оксид - полупроводник) транзистора является кремниевая подложка с проводимостью  $p$ - или  $n$ -типа. На подложке на малом расстоянии друг от друга (рис. 3.4) созданы две области - истока и стока с проводимостью, противоположной проводимости материала подложки.

Между стоком и истоком над поверхностью расположена металлическая пленка — затвор, изолированная от подложки тонким слоем диэлектрика (диоксида кремния  $\text{SiO}_2$ ). Отсюда и другие названия приборов этого класса: МДП-транзисторы или транзисторы с изолированным затвором.

Участок подложки под затвором между истоком и стоком образует проводящий канал. Работа МОП транзистора основана на изменении концентрации свободных носителей заряда в канале под влиянием электрического поля, создаваемого напряжением, приложенным между затвором и истоком. Для этих приборов характерна взаимозаменяемость стока и истока, т. е. ток в канале может протекать в обоих направлениях в зависимости от полярности напряжения, приложенного к каналу.

В зависимости от устройства канала проводимости различают МОП транзисторы со встроенным и индуцированным (наведенным) каналом. Это в равной мере относится к приборам  $p$ - и  $n$ - типов. У транзисторов со встроенным каналом канал является элементом конструкции, а у приборов с индуцированным каналом канал, как таковой, отсутствует: он наводится внешним напряжением.

Структура МДП-транзистора со встроенным каналом приведена на рис. 3.4 а, а их условные обозначения с каналами разной проводимости - на рис.3.4б. Основой транзистора со встроенным каналом является кристалл кремния  $p$ - или  $n$ -типа проводимости.

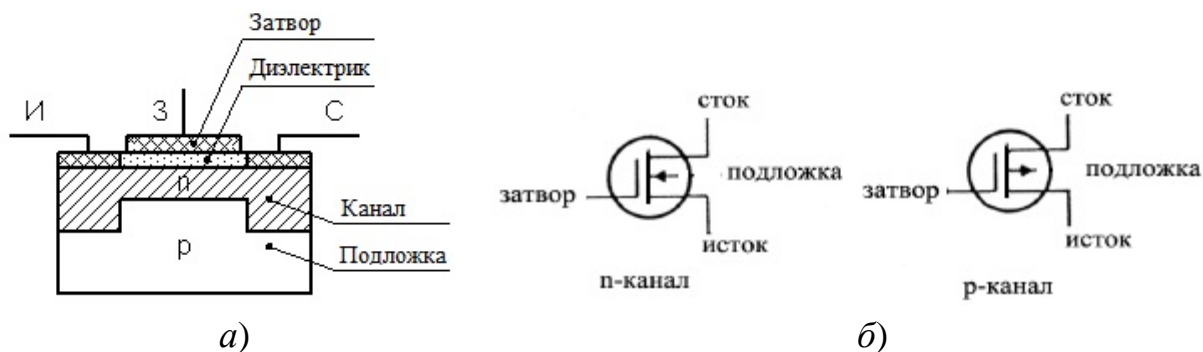


Рисунок 3.4 – Устройство МОП-транзистора со встроенным каналом (а) и условное обозначение (б)

Суть работы такого транзистора заключается в следующем. Под действием электрического поля между стоком и истоком через канал будут протекать основные носители зарядов, т. е. будет существовать ток стока. При подаче на затвор положительного напряжения электроны как неосновные носители подложки будут притягиваться в канал. Канал обогатится носителями заряда, и ток стока увеличится.

При подаче на затвор отрицательного напряжения электроны из канала будут уходить в подложку, канал обеднится носителями зарядов, и ток стока уменьшится. При достаточно больших напряжениях на затворе все носители заряда будут из канала уходить в подложку, и ток стока станет равным нулю.

Зависимость выходного тока Исток-Сток  $I_c$  МДП-транзистора со встроенным каналом от напряжения на затворе  $U_{зи}$  изображена на рис.3.5а.

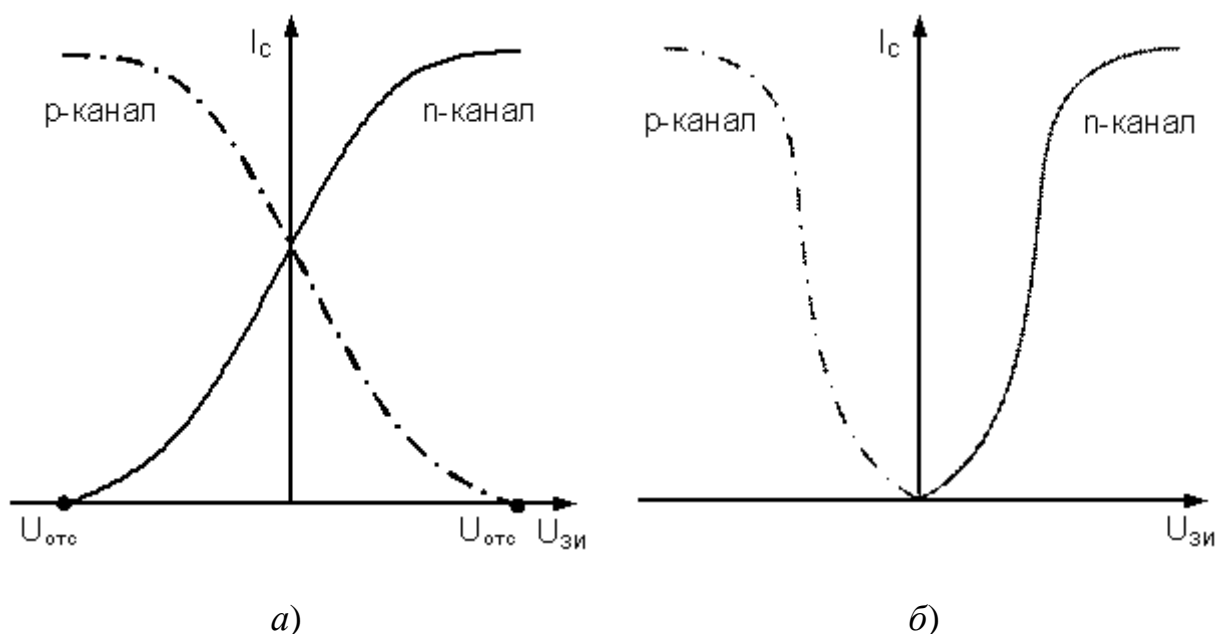
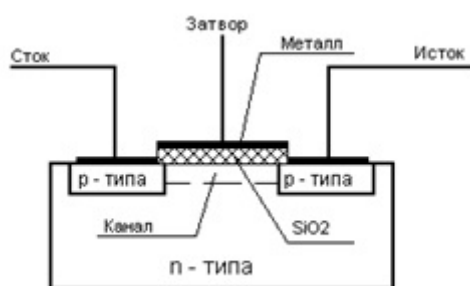


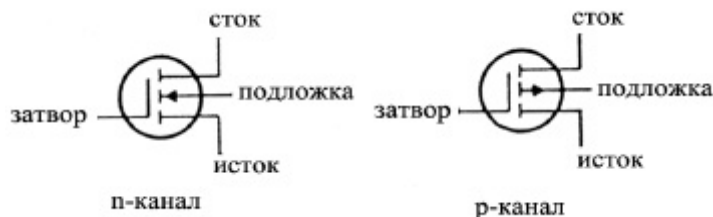
Рисунок 3.5 – Зависимости выходного тока МДП-транзисторов от входного напряжения (а) встроенный канал, (б) индуцированный канал

В транзисторе с индуцированным каналом при напряжениях на затворе, равных нулю, канал отсутствует, и ток стока будет равен нулю. При положительных напряжениях на затворе электроны, как неосновные носители заряда подложки р-типа, будут притягиваться к затвору, а дырки будут уходить вглубь подложки. В результате в тонком слое под затвором концентрация электронов превысит концентрацию дырок, т. е. в этом слое полупроводник поменяет тип своей проводимости. Образуется (индуцируется) канал, и в цепи стока потечёт ток. Следовательно, МОП-транзисторы с индуцированным каналом могут работать только в режиме обогащения.

Устройство МДП-транзистора с индуцированным затвором показано на рис.3.6а, а его условное обозначение в схемах на 3.6б. На рис.3.5б изображена зависимость тока Исток-Сток  $I_c$  МДП-транзистора с индуцированным каналом от напряжения на затворе  $U_{зи}$ .



а)



б)

Рисунок 3.6 – Устройство МОП-транзистора с индуцированным каналом (а) и условное обозначение (б)

МОП-транзисторы со встроенным каналом находят применение в аналоговой технике. В дискретной технике употребляется МОП - транзистор с индуцированным каналом.

Напряжение питания подают на сток и исток. У транзисторов с каналом *n*-типа сток должен иметь положительный потенциал относительно истока. Так как подложка образует с каналом диодное соединение, то напряжение на ней должно быть ниже напряжения проводимости. Она может быть соединена с истоком или с точкой схемы, в которой напряжение ниже, чем у истока *n*-канального и выше чем у *p*-канального МОП-транзистора. Вывод подложки в большинстве случаев соединяют с истоком.

Основными параметрами униполярных транзисторов являются следующие:

**коэффициент усиления** — отношение изменения напряжения исток-сток к изменению напряжения затвор-исток при постоянном токе стока;

**крутизна стоко-затворной характеристики**, чем она больше, тем «острее» реакция транзистора на изменение напряжения на затворе;

**входное сопротивление**  $R_{вх.}$ , определяется сопротивлением обратно смещенного *p-n* перехода и обычно достигает единиц и десятков МОм (что выгодно отличает полевые транзисторы от биполярных «родственников»);

**максимальный ток стока**  $I_{с макс}$  при фиксированном напряжении затвор-исток;

**максимальное напряжение сток-исток**  $U_{си}$ , после которого уже наступает пробой;

**внутреннее (выходное) сопротивление**  $R_{вых.}$ . Оно представляет собой сопротивление канала для переменного тока (напряжение затвор-исток — константа).

### 3.3. Усилительный каскад на основе биполярного транзистора

Схема однокаскадного усилителя переменного тока на основе биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером показана на рис.3.7.

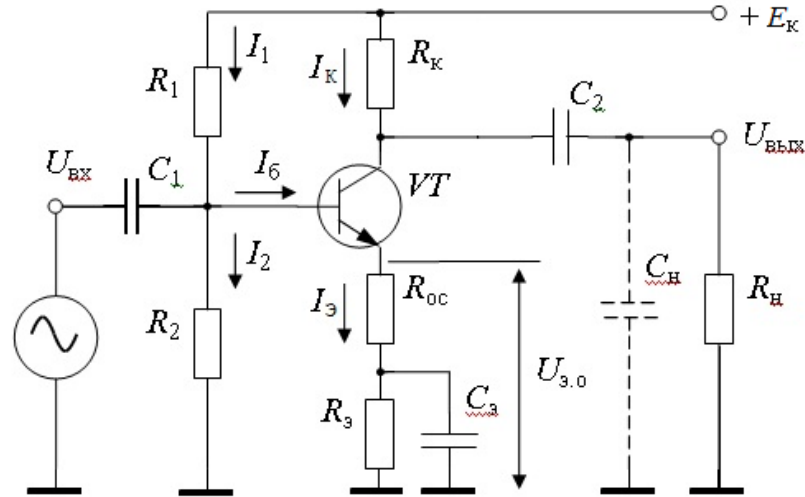


Рисунок 3.7 – Схема усилительного каскада на биполярном транзисторе

Для установки тока покоя  $I_{60}$  на линейном участке входной характеристики (рис.3.3а) используется делитель напряжения  $R_1, R_2$ . Нагрузочный резистор включается в цепь коллектора транзистора. Параллельное соединение резистора  $R_3$  и  $C_3$  обеспечивает температурную стабилизацию тока покоя коллектора за счет обратной связи по постоянному току.  $R_{oc}$  создает отрицательную обратную связь по переменному току, которая улучшает частотные характеристики усилительного каскада.

Источник входного сигнала подключается к управляющему электроду (базе) транзистора через разделительный конденсатор  $C_1$ . Усиленный сигнал снимается с нагрузочного сопротивления  $R_н$ , подключаемого к коллектору транзистора через разделительную емкость  $C_2$ , которая пропускает на выход только переменную составляющую. Процесс изменения сигналов в различных точках схемы показан на рисунках 3.8а и б.

Схема усилительного каскада переменного тока на базе полевого транзистора, включенного по схеме с общим истоком, показана на рис.3.9. Основными элементами каскада являются источник питания  $+E_c$ , транзистор Т и резистор  $R_c$ . Нагрузка подключена через разделительный конденсатор  $C_{p2}$  к стоку транзистора. Элементы  $R_3$ ,  $R_1$ ,  $R_и$  предназначены для задания  $U_{зип}$  в режиме покоя. Резистор  $R_и$  создает в каскаде отрицательную обратную связь по постоянному току, служащую для стабилизации режима покоя при изменении температуры и разбросе параметров транзистора.

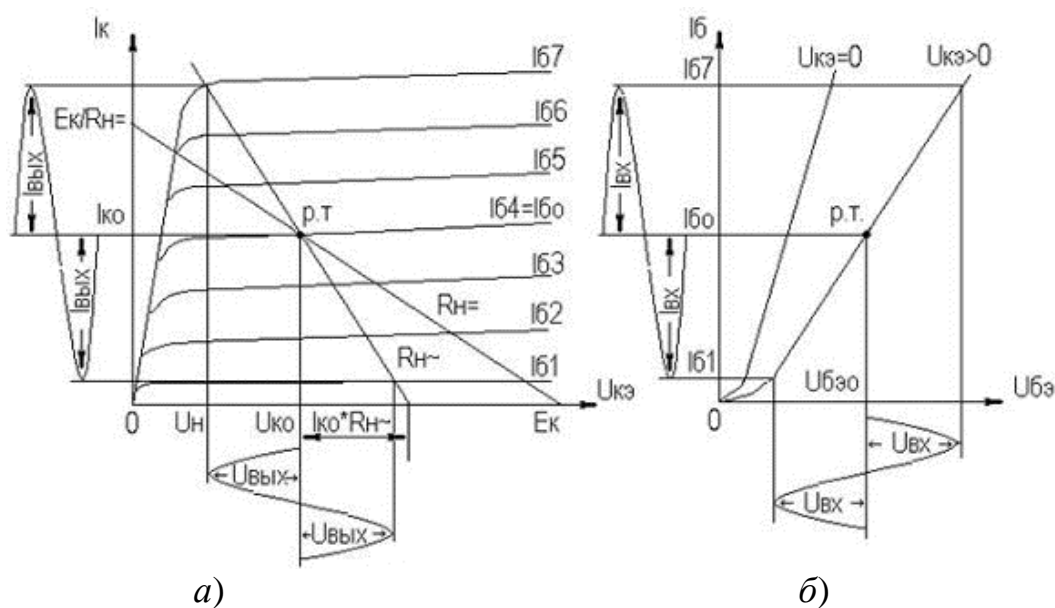


Рисунок 3.8 – Графики изменения сигналов в различных точках усилителя

Конденсатор  $C_{и}$  предназначен для исключения отрицательной обратной связи по переменному току. Разделительный конденсатор  $C_{p1}$  отделяет по постоянному току источник сигнала от делителя напряжения и обеспечивает связь по переменному току усилительного каскада с источником входного сигнала.

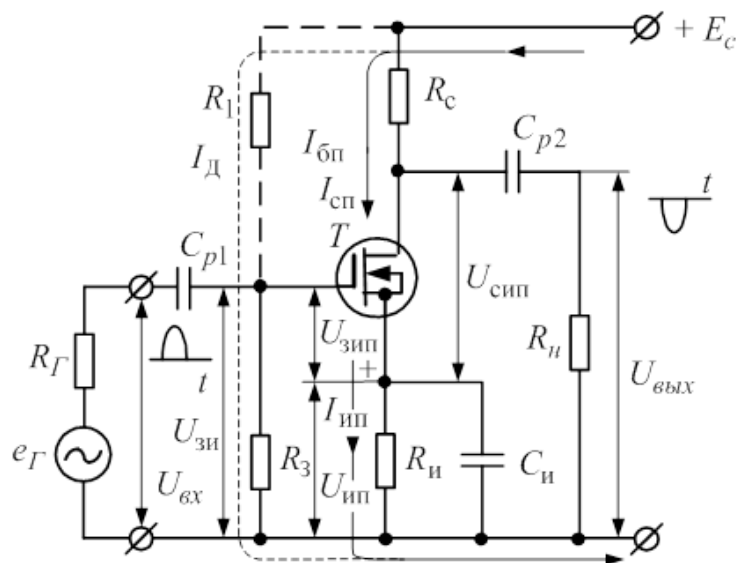


Рисунок 3.9 – Схема усилительного каскада на базе МДП-транзистора, включенного по схеме с общим истоком

На рис. 3.10 показаны графики изменения всех токов и напряжений полевого МДП-транзистора в схеме с ОИ при гармоническом входном сигнале, построенные по статическим характеристикам транзистора.



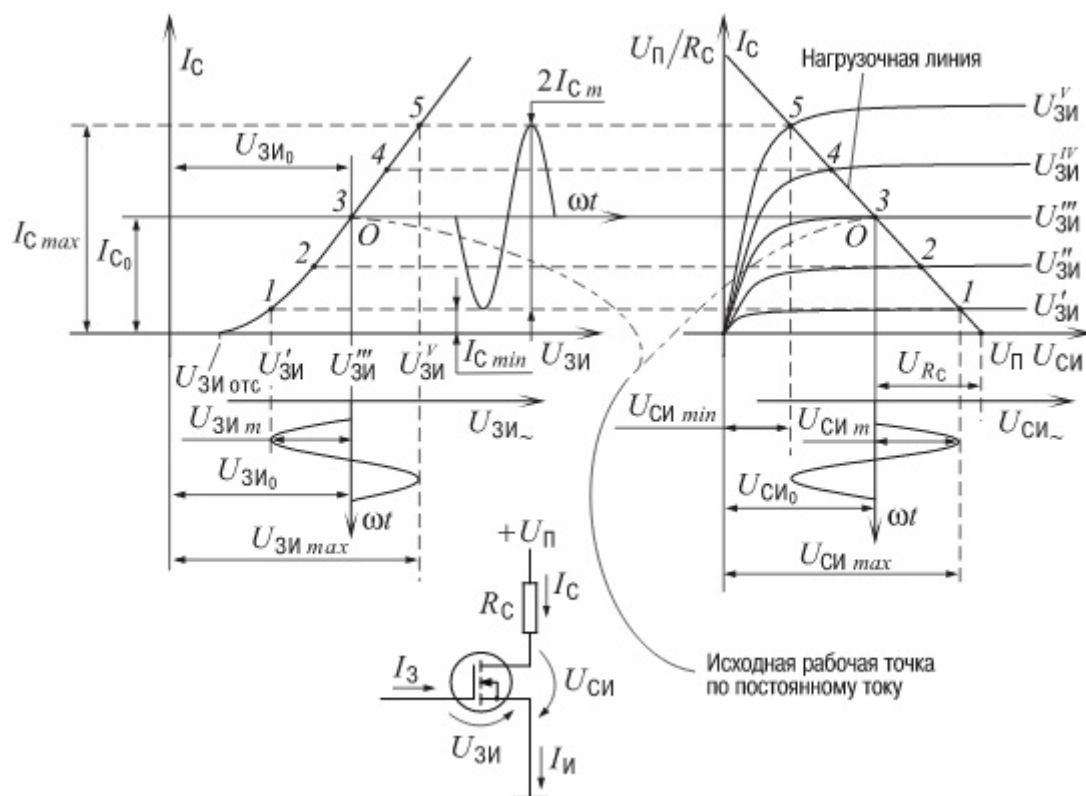


Рисунок 3.10 – Графики изменения сигналов в различных точках усилителя на основе МДП-транзистора

### 3.4. Ключевой режим работы транзисторов

Ключевым (вентильным) называют такой режим работы транзистора, при котором он может быть либо полностью открыт (режим насыщения выходного тока), либо полностью закрыт (режим отсечки выходного тока), а промежуточное состояние, при котором транзистор частично открыт, в идеале отсутствует. Мощность, которая выделяется в транзисторе, в статическом режиме равна произведению тока, протекающего через его выводы (коллектор-эмиттер или сток-исток), и напряжения, приложенного между этими выводами.

В идеальном случае, при открытом транзисторе, т.е. находящимся в режиме насыщения, его сопротивление между выводами (коллектор-эмиттер или сток-исток) стремится к нулю. Мощность потерь в открытом состоянии представляет произведение равного нулю напряжения на определённую величину тока. Таким образом, рассеиваемая мощность равна нулю.

В идеальном случае, когда транзистор закрыт, т.е. в режиме отсечки, его сопротивление между выводами (коллектор-эмиттер или сток-исток) стремится к бесконечности. Мощность потерь в закрытом состоянии есть произведение определённой величины напряжения на равное нулю значение тока. Следовательно, мощность потерь равна нулю.

Таким образом, в ключевом режиме в идеальном случае, мощность потерь транзистора равна нулю. На практике, естественно, когда транзистор открыт, присутствует некоторое небольшое сопротивление (коллектор-эмиттер или сток-исток). Когда транзистор закрыт, по выводам (коллектор-эмиттер или сток-исток) протекает ток небольшой величины. Таким образом, мощность потерь в транзисторе в статическом режиме мала. Однако в динамическом режиме, когда транзистор открывается или закрывается, его рабочая точка проходит линейную область, в которой ток через транзистор может условно составлять половину максимального тока, а напряжение (коллектор-эмиттер или сток-исток) может достигать половины от максимальной величины. Таким образом, в динамическом режиме в транзисторе выделялась бы огромная мощность потерь, которая свела бы на нет все замечательные качества ключевого режима. Однако длительность нахождения транзистора в динамическом режиме много меньше длительности пребывания в статическом режиме и потери на нагревание транзистора очень малы. Но с повышением частоты переключения транзистора потери в нем растут и происходит разогрев транзистора, что может привести к выходу его из строя.

Практически все цифровые элементы информационной и вычислительной техники построены на транзисторах (биполярных или чаще на МДП), работающих в ключевом режиме.

Биполярные транзисторы, работающие в режиме ключа чаще всего включаются по схеме с общим эмиттером. На рис.3.11 приведены схема транзисторного ключа (а), его эквивалентная схема контактного ключа (б) и временная диаграмма входного и выходного сигналов (в).

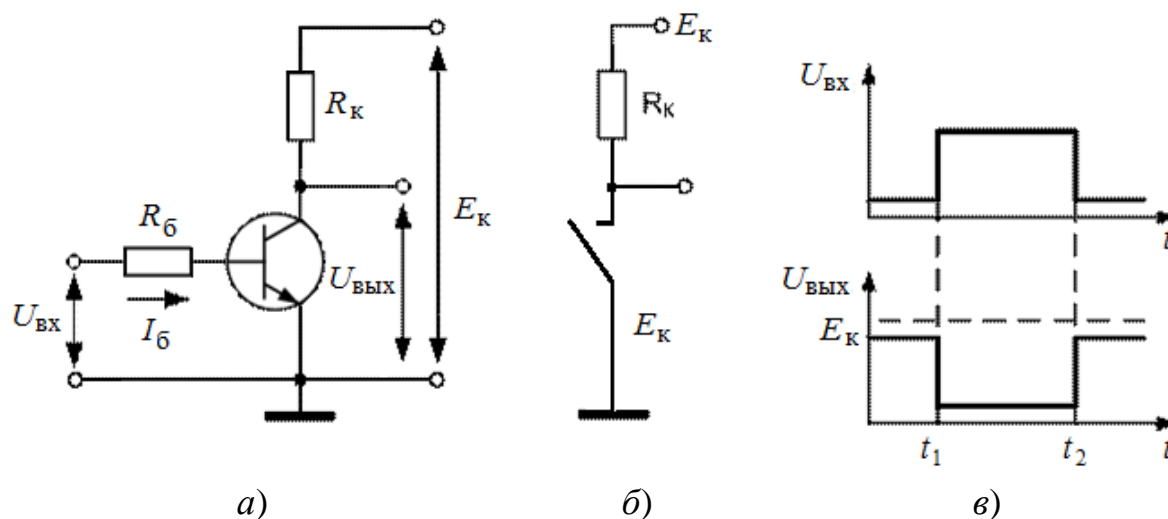


Рисунок 3.11 – Схема ключа на биполярном транзисторе (а), эквивалентная схема (б) и временная диаграмма (в)

Резистор  $R_б$  предназначен для ограничения тока базы транзистора  $I_б$ , чтобы он не превышал максимально допустимого значения. В промежуток времени от 0 до  $t_1$  входное напряжение и ток базы близки к нулю, и транзистор находится в режиме отсечки. Напряжение  $U_{КЭ}$ , является выходным и будет близко к  $E_K$ . В промежуток времени от  $t_1$  до  $t_2$  входное напряжение и ток базы

транзистора становятся максимальными, и транзистор перейдет в режим насыщения. После момента времени  $t_2$  транзистор переходит в режим отсечки. Следовательно, можно сделать вывод, что транзисторный ключ является инвертором, т. е. изменяет фазу сигнала на  $180^\circ$ .

В реальных ключевых схемах изменение состояния транзисторов под действием ступенчатого входного напряжения происходит в течение некоторого времени, зависящего от целого ряда факторов: типа транзистора ключа, режимов его работы, характера нагрузки и т.д. Процесс переключения биполярного транзистора определяется двумя факторами: процессами накопления и рассасывания неосновных носителей в базе, формирующих ток коллектора  $i_k$ , и наличием емкостей эмиттерного и коллекторного переходов  $C_э$  и  $C_к$ , которые перезаряжаются при переключениях. По этой причине изменения выходных токов ключа при отпирании и запираании транзистора отличаются от линейного закона, а форма выходного напряжения отличается от формы входного.

На рис.3.12 показана схема реального ключа на основе МДП-транзистора (а) и его временная диаграмма (б). При закрытом транзисторе выходная емкость  $C_{сн}$  заряжена до напряжения, практически равного  $E$ . Когда входное напряжение превышает пороговое напряжение  $U_{пор}$  транзистор открывается и его сопротивление становится очень мало (но не равняется 0). Емкость  $C_{сн}$  начинает разряжаться постоянным током  $I_p$ , определяемым небольшим сопротивлением проводящего канала транзистора, в течение времени  $t_{вкл.}$ . За это время выходное напряжение ключа падает до величины близкой к нулю.

При запирании транзистора (уменьшение  $U_{вх}$  до нуля) происходит зарядка емкости  $C_{сн}$  через резистор  $R$  от напряжения источника питания  $E$  в течение времени  $t_{выкл.}$ .

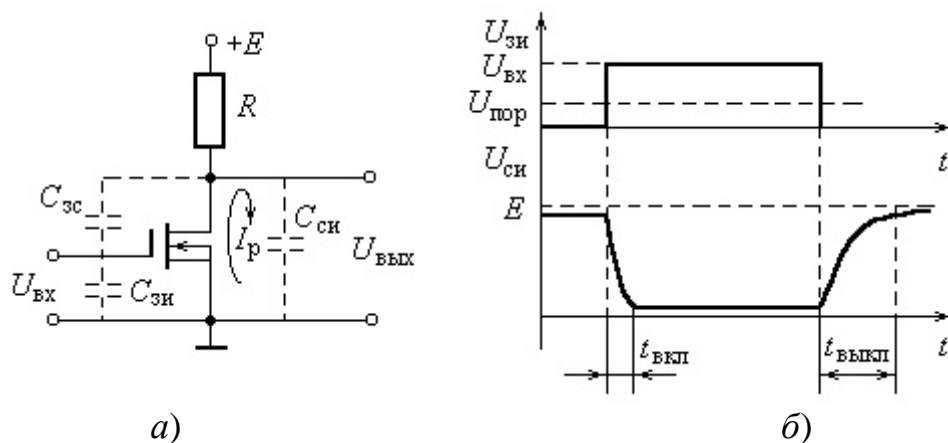


Рисунок 3.12 – Схема реального ключа на МДП-транзисторе (а) и временная диаграмма работы ключа (б)

Это время, как правило, больше времени включения, так как сопротивление нагрузочного резистора  $R$  значительно больше сопротивления канала транзистора в проводящем состоянии.

Недостатком ключевых схем как на биполярных, так и на полевых транзисторах потери энергии на резисторах при открытых транзисторах, что приводит к разогреву микросхем. Этот недостаток ликвидирован в ключевых элементах, выполненных на основе комплементарных (дополняющих) транзисторов. В таких ключах используется пара транзисторов с одинаковыми параметрами, но с различной проводимостью. Комплементарные ключи могут быть выполнены как на основе биполярных, так и на МОП-транзисторах. Последние приобрели более широкое распространение по причине более простой технологии изготовления, меньших габаритов и возможности работы в широком диапазоне напряжений источников питания. Для их обозначения применяются сокращения КМДП, К-МОП. Зарубежное обозначение КМОП - **CMOS** (*Complementary Metal-Oxide Semiconductor*). В КМОП ключах применяются пары транзисторов с абсолютно одинаковыми параметрами, но один транзистор имеет затвор  $n$ -типа, а другой транзистор имеет затвор  $p$ -типа.

На рисунке 3.13а изображена схема КМОП ключа (вентиля) на основе полевых транзисторов с индуцированным каналом, который осуществляет инверсию входного сигнала (элемент НЕ). То есть если на вход подается высокий уровень напряжения (логическая единица), то с выхода снимается логический ноль и наоборот. Эквивалентные схемы КМОП ключа на контактных ключах при двух значениях сигналов управления показаны на рис. 3.13б и рис.3.13в. Как видно из эквивалентных схем, выход инвертора соединен либо с шиной сигнального заземления (на выходе логический 0), либо с шиной источника питания (на выходе логическая 1). В схеме КМОП инвертора, в отличие от схем с резистором, сквозной ток отсутствует при любом состоянии вентиля. Это означает, что при идеальных ключах схема не потребляет энергии. В реальных условиях закрытый транзистор имеет очень большое, но конечное сопротивление и в устройстве протекает очень маленький (доли микроампер) ток. В момент переключения, когда оба транзистора находятся в полукотрытом состоянии, сквозной ток существенно возрастает.

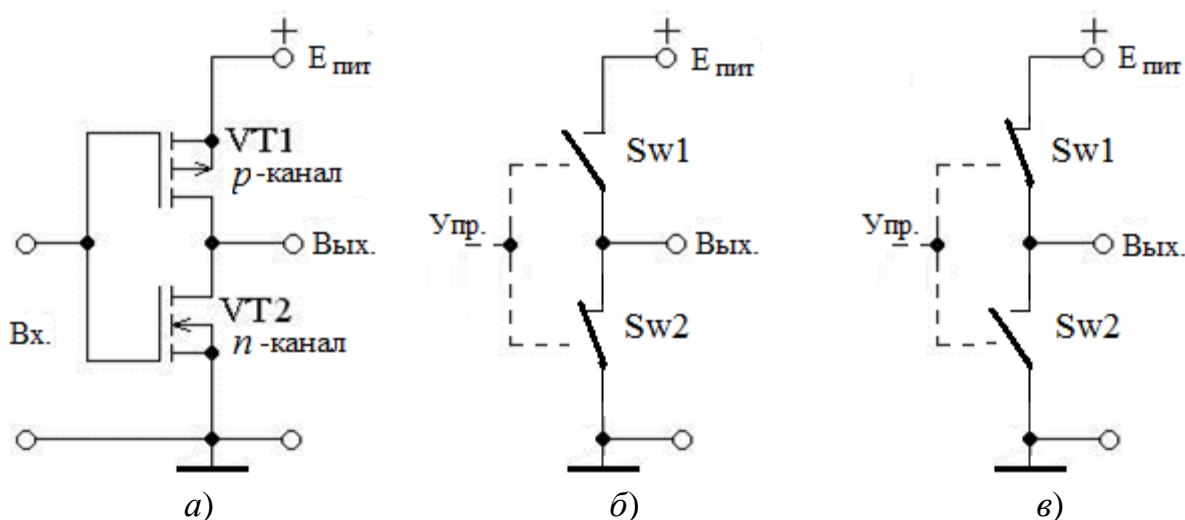


Рисунок 3.13 – Схема КМОП-ключа (а), эквивалентные схемы при различных сигналах управления на входе (б,в)

Это приводит к тому, что при увеличении частоты переключения средний ток, потребляемый схемой, увеличивается (рисунок 3.14), что приводит к разогреву ключевых элементов.

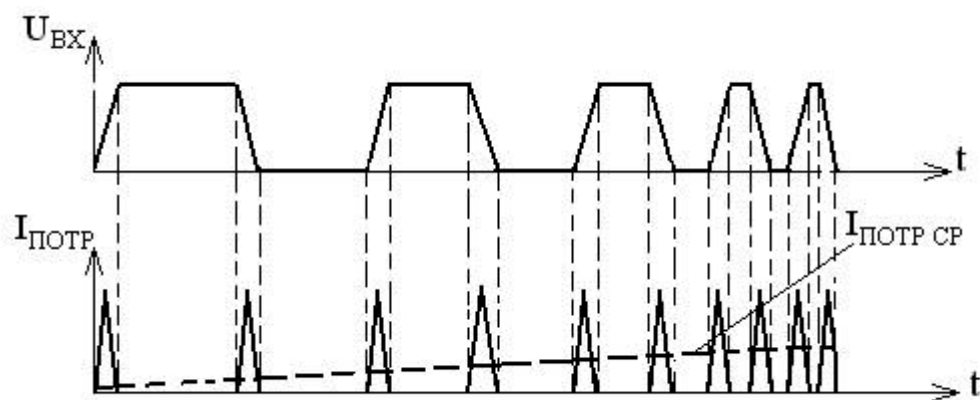


Рисунок 3.14 – Иллюстрация возрастания потребляемого тока ключевым МОП элементом при увеличении частоты переключения

При превышении температуры КМОП элемента выше допустимой он может выйти из строя за счет теплового пробоя.