

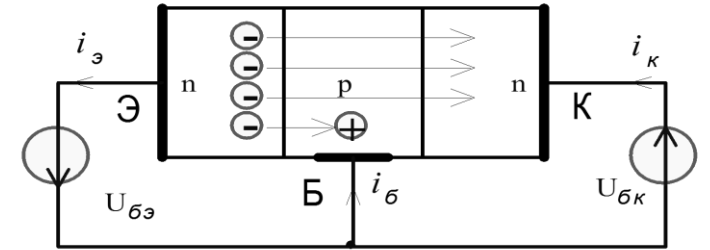
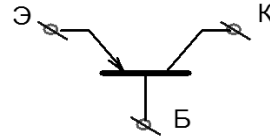
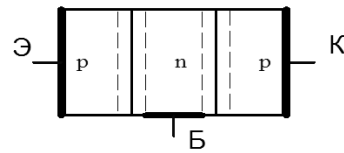
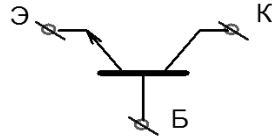
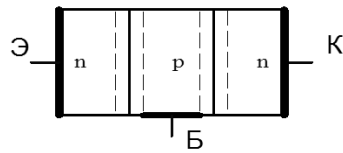
Аналоговая электроника и техника измерений.

Биполярный транзистор.

Полевой транзистор.

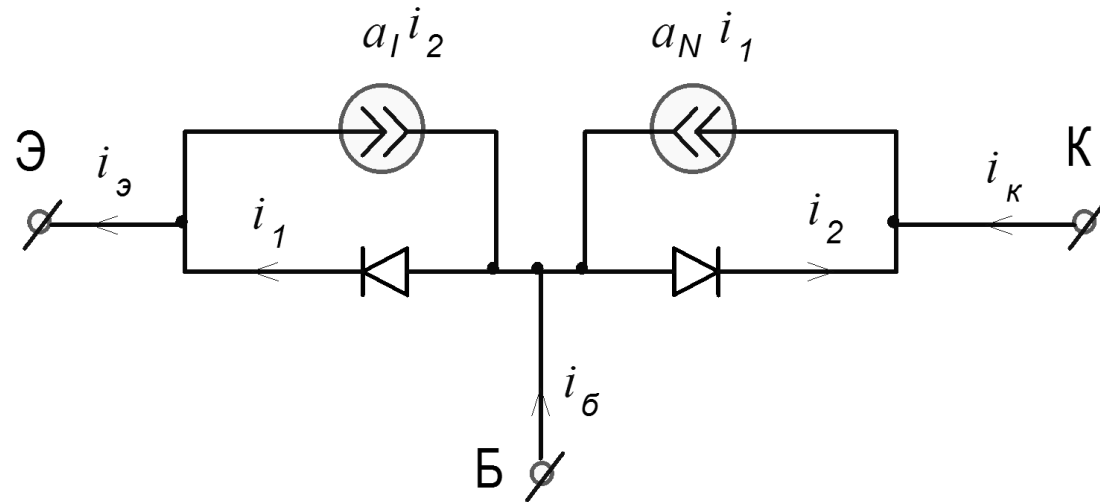
Тиристор.

Биполярный транзистор



Сместим Б-Э переход в прямом, а К-Б — в обратном направлении с помощью источников ЭДС. Через база-эмиттерный переход благодаря инжекции электронов из эмиттера будет протекать ток $i_Э$. Инжекция «дырок» из базы в эмиттер будет незначительной вследствие того, что база относительно слабо легирована. Из-за малой толщины базы почти все электроны, пройдя базу, через так называемое время пролета достигнут коллектора. Только небольшая доля электронов рекомбинируется в базе с «дырками». Убыль этих «дырок» компенсируется током базы $i_Б$. Отсюда понятно, что $i_Б \ll i_Э$. Обратное смещение коллекторного перехода способствует тому, что электроны, подошедшие к нему, захватываются электрическим полем перехода и переносятся в коллектор. В то же самое время, это поле препятствует переходу электронов из коллектора обратно в базу. Ток коллектора $i_К$ незначительно меньше тока эмиттера, но при этом сильно превышает ток базы.

Модель Эберса-Молла



α_N – нормальный коэффициент передачи тока (из эмиттера в коллектор), α_I – инверсный коэффициент передачи тока (из коллектора в эмиттер); $\alpha_N i_1$ – генератор коллекторного тока; $\alpha_I i_2$ – генератор эмиттерного тока.

$$i_э = i_1 - \alpha_I i_2 ,$$

$$i_к = \alpha_N i_1 - i_2$$

Модель Эберса-Молла

$I_{Э_0}$ - тепловой ток эмиттерного р-п перехода при замкнутых базе и коллекторе; $I_{К_0}$ - тепловой ток коллекторного р-п перехода при замкнутых базе и эмиттере.

$$i_1 = I_{Э_0} \left(e^{\frac{U_{БЭ}}{\varphi_T}} - 1 \right), \quad i_2 = I_{К_0} \left(e^{\frac{U_{КБ}}{\varphi_T}} - 1 \right)$$

$$i_К = \alpha_N I_{Э_0} \left(e^{\frac{U_{БЭ}}{\varphi_T}} - 1 \right) - I_{К_0} \left(e^{\frac{U_{КБ}}{\varphi_T}} - 1 \right)$$

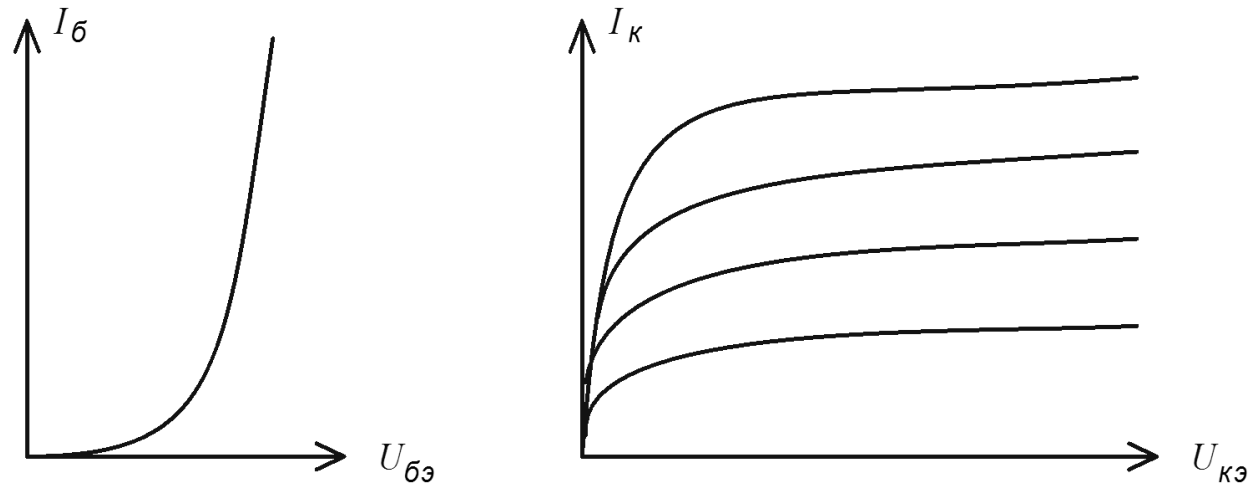
$$i_Э = I_{Э_0} \left(e^{\frac{U_{БЭ}}{\varphi_T}} - 1 \right) - \alpha_I I_{К_0} \left(e^{\frac{U_{КБ}}{\varphi_T}} - 1 \right)$$

$$i_Г = i_Э - i_К$$

В общем случае в транзисторах справедливо равенство: $\alpha_N I_{Э_0} \approx \alpha_I I_{К_0}$

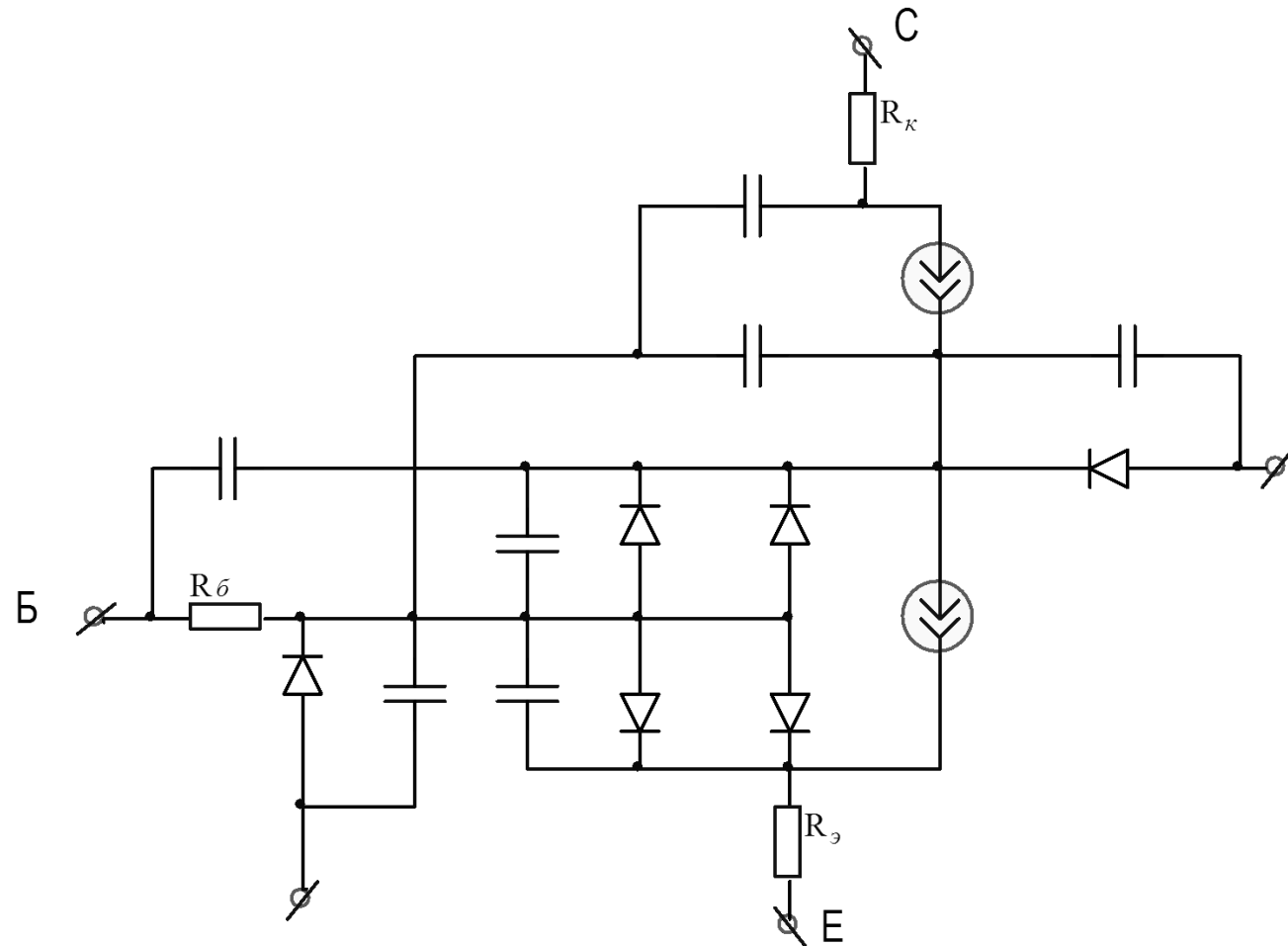
Соотношения Эберса-Молла

$$i_K = \alpha_N i_{\mathcal{E}} - I_{K_0} \left(e^{\frac{U_{KB}}{\varphi_T}} - 1 \right), \quad U_{БЭ} = \varphi_T \ln \left[\frac{i_{\mathcal{E}}}{I_{\mathcal{E}_0}} + 1 + \alpha_N \left(e^{\frac{U_{KB}}{\varphi_T}} - 1 \right) \right]$$

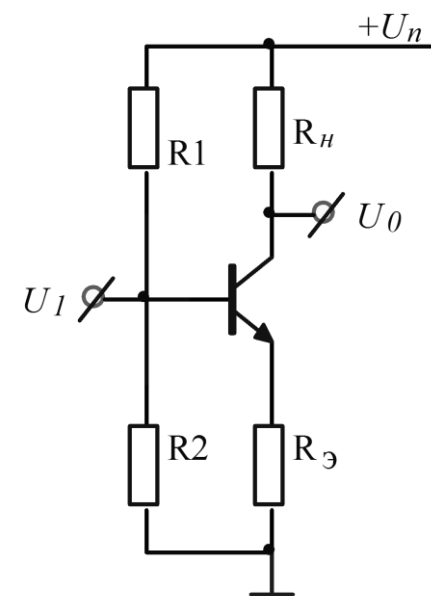
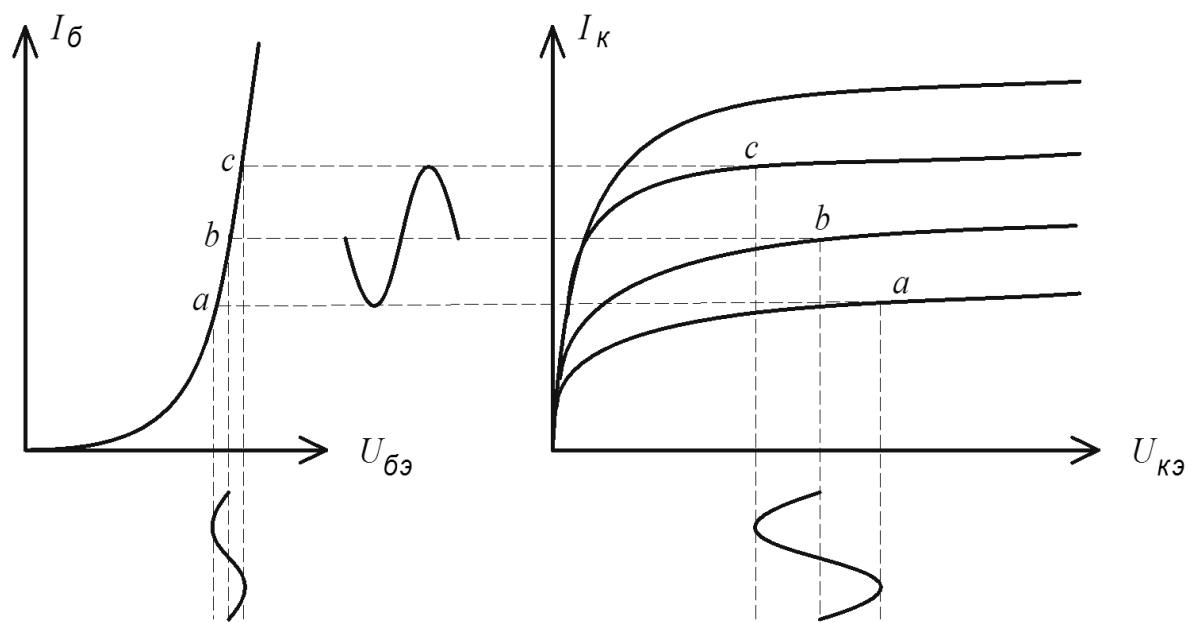


$$\beta = \frac{\alpha_N}{1 - \alpha_N}$$

Модель Гуммеля-Пуна

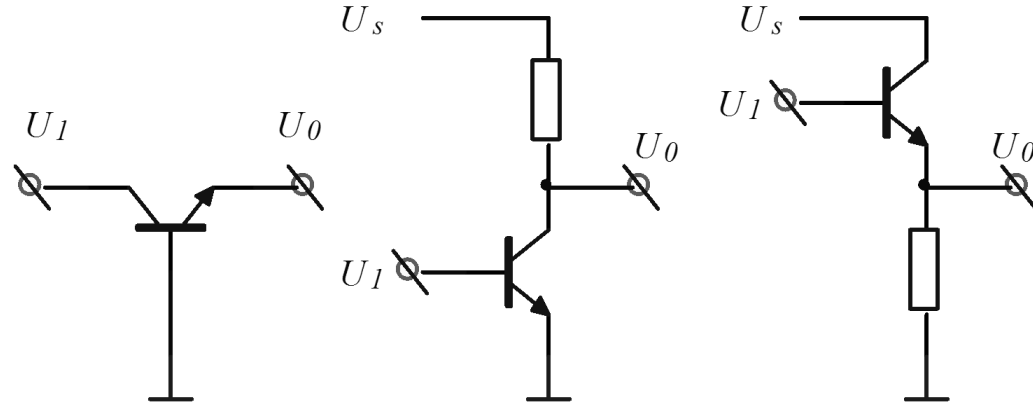


Рабочая точка транзистора

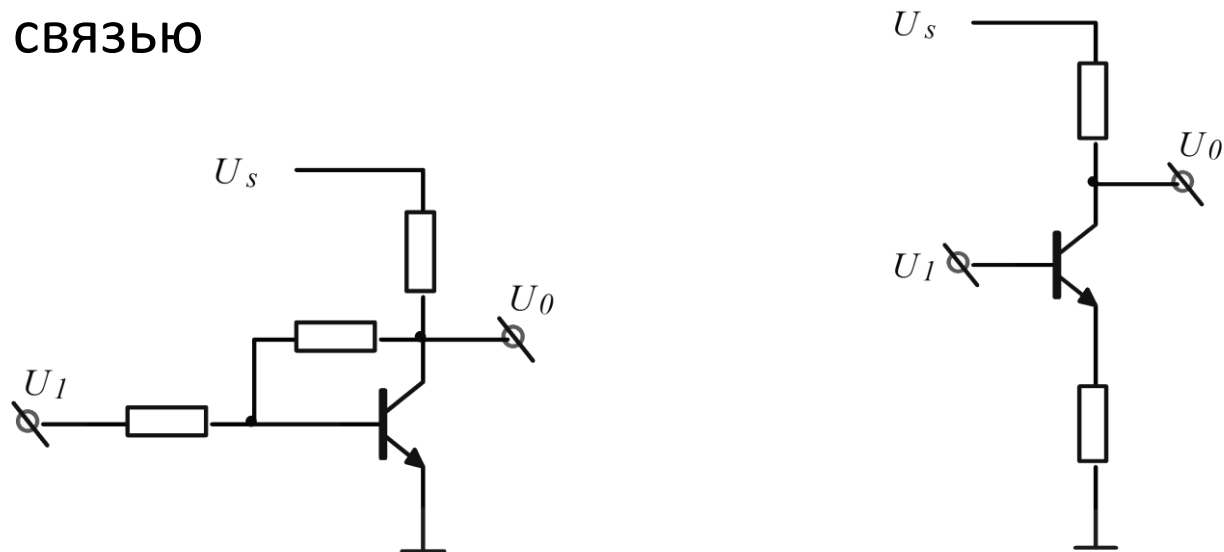


Типовые схемы на транзисторах

Базовые схемы включения

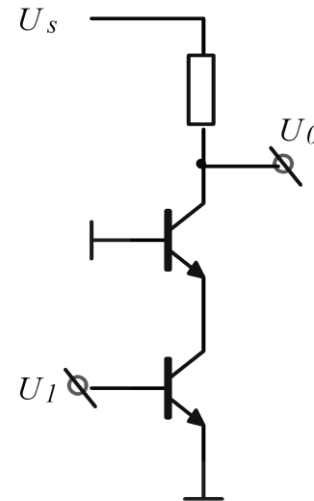
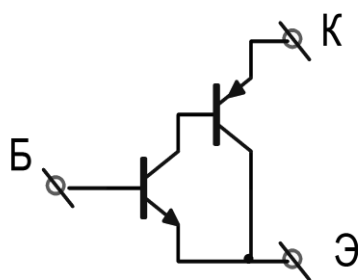
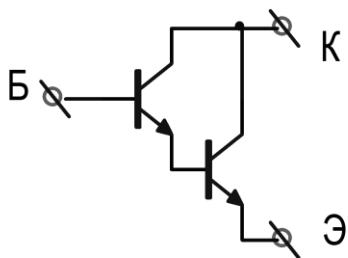


Схемы с обратной связью

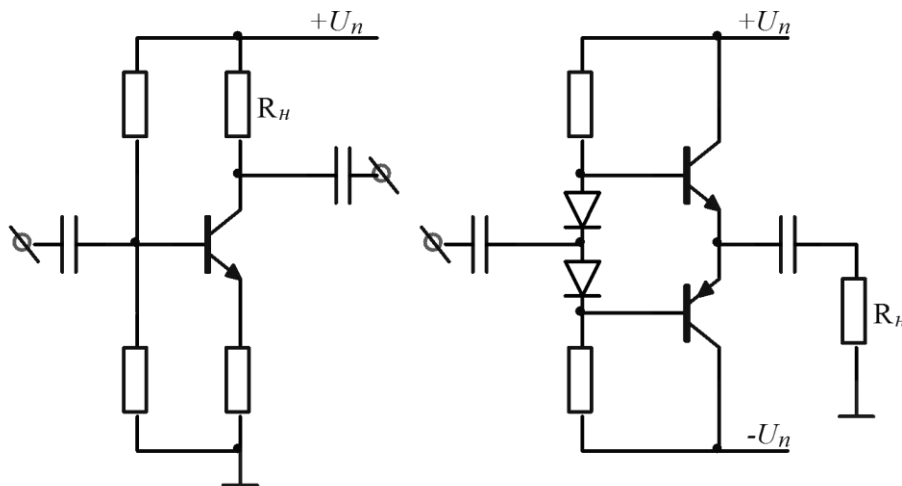


Типовые схемы на транзисторах

Составные схемы

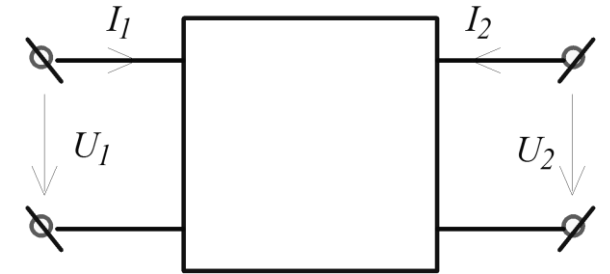


Усилители мощности



Модель в виде четырехполюсника

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= H_{11}\dot{I}_1 + H_{12}\dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 &= H_{21}\dot{I}_1 + H_{22}\dot{U}_2\end{aligned}$$

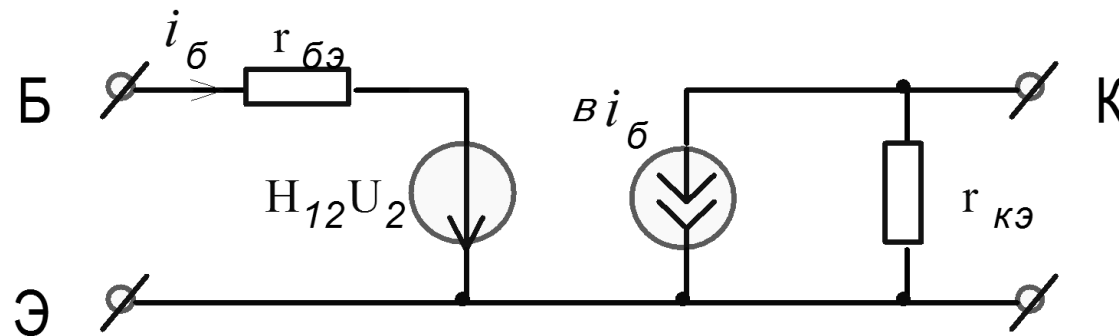


H_{11} - это сопротивление, через которое течет входной ток;

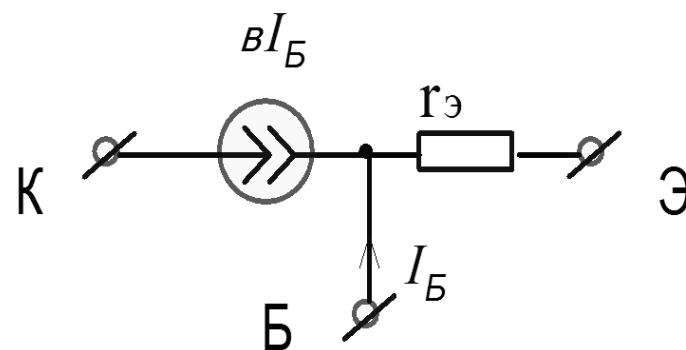
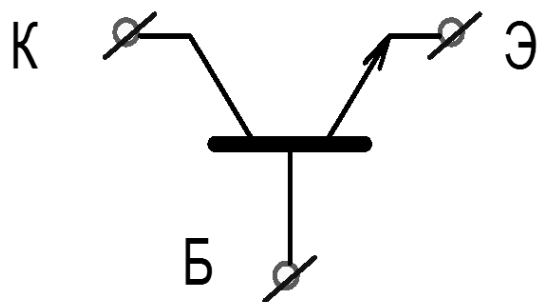
H_{12} - это параметр обратной передачи по напряжению;

H_{21} - это параметр прямой передачи тока (β);

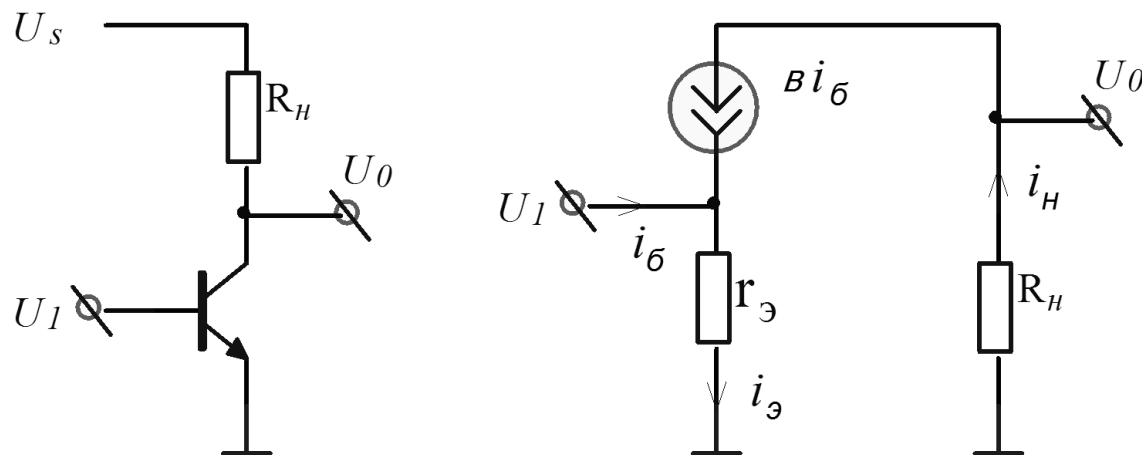
H_{22} - это проводимость, через которую течет выходной ток (полная нагрузка).



Упрощенная модель биполярного транзистора



Пример. Расчет схемы с ОЭ.



$$U_1 = i_э r_э = (i_б + \beta i_б) r_э = (\beta + 1) i_б r_э$$

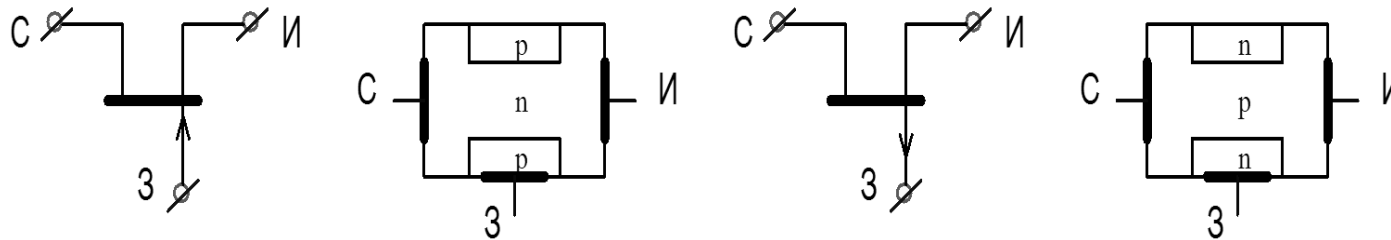
$$U_0 = i_н R_н = \beta i_б R_н$$

$$K_U = \frac{U_0}{U_1} = \frac{\beta R_н}{(\beta + 1) r_э} ,$$

$$K_I = \frac{i_н}{i_б} = \beta ,$$

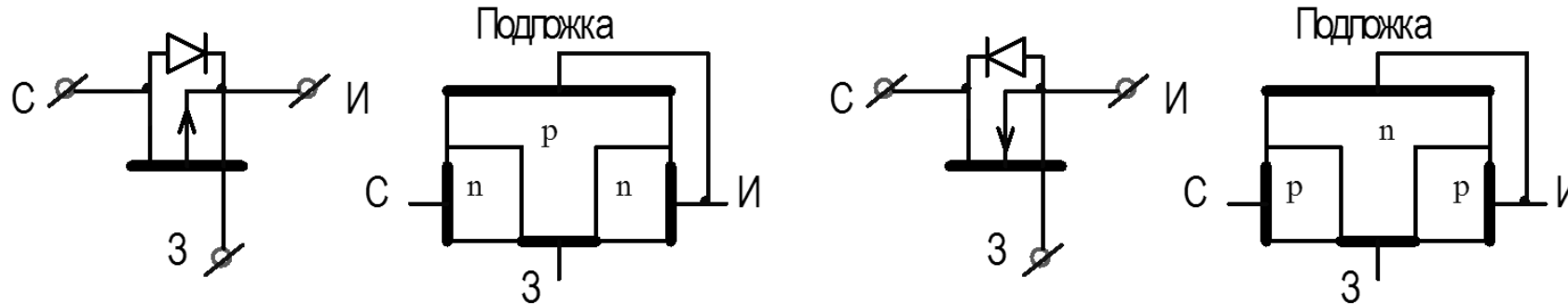
$$R_{вх} = \frac{U_1}{i_б} = (\beta + 1) r_э$$

Полевой транзистор с управляющим переходом (JFET)



Рабочим элементом **полевого транзистора с управляющим переходом** является полупроводник p -, либо n -типа. К противоположным концам такого полупроводника подводится внешнее напряжение, что приводит к протеканию через полупроводник некоторого тока. Чтобы сделать возможным управление в полупроводниковую структуру, вводится небольшая область с противоположным основному типу проводимости. Однако здесь эта область не разделяет исходную структуру на две, части как в биполярном транзисторе, а лишь создает в ней на пути протекания потока зарядов некоторое достаточно узкое место - канал. С помощью электрического поля, создаваемого потенциалом затвора, воздействующего на созданный в полупроводниковой структуре канал мы можем управлять током через него. Фактически полевой транзистор представляет собой резистор управляемый напряжением. Соответственно полевой транзистор может быть с n –каналом или p –каналом.

Полевой транзистор с МДП-структурой (MOSFET)



В **МДП-транзисторах** нет четкой монокристаллической полупроводниковой структуры с одним типом проводимости, которая играла бы роль канала. Здесь канал «спрятан» внутри особой области полупроводника (*подложки*) с типом проводимости, противоположным тому, который необходим для протекания потока соответствующих данному транзистору зарядов. Протекание тока по-прежнему обусловлено наличием некоторого внешнего потенциала, прикладываемого к областям стока и истока, но дополнительным условием возникновения тока является наличие в структуре самого канала — пути, по которому возможно протекание тока. Канал возникает при приложении напряжения затвора выше порогового значения (транзисторы с индуцированным каналом), либо канал присутствует в подложке изначально (транзистор со встроенным каналом) и для запираения требуется подача на затвор напряжения противоположной полярности.

ВАХ полевого транзистора

Удельная крутизна

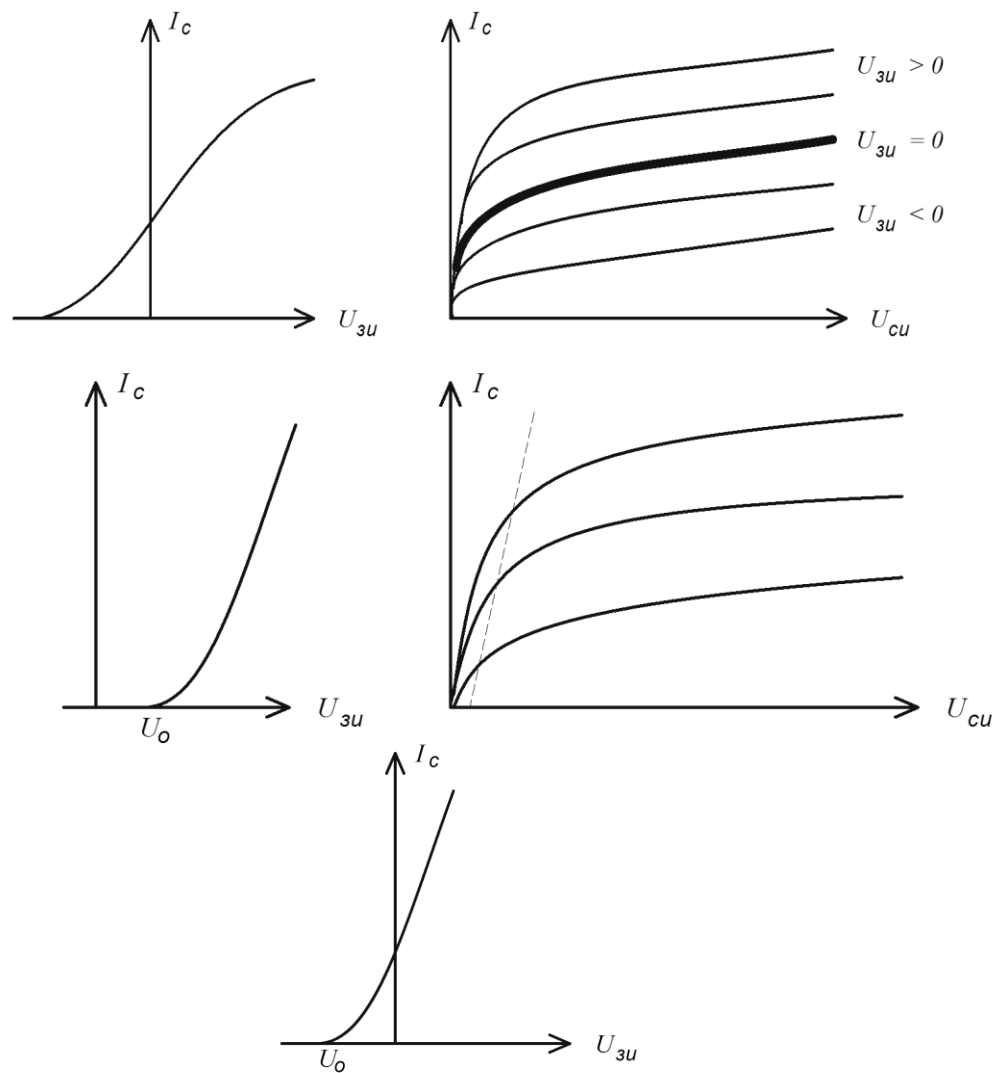
$$b = \mu C_0 \frac{W}{L}$$

Здесь μ – приповерхностная подвижность носителей, C_0 - удельная емкость затвор-канал, W – ширина, L – длина канала.

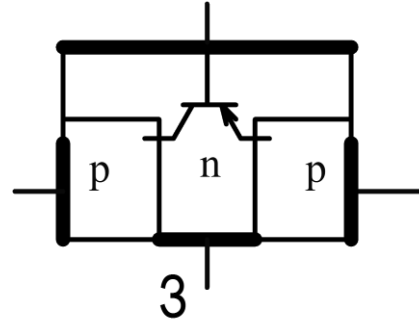
$$I_c = b((U_{зи} - U_0)U_{си} + \frac{U_{си}^2}{2})$$

$$I_c = b(U_{зи} - U_0)U_{си}$$

$$I_c = \frac{1}{2}b(U_{зи} - U_0)^2$$

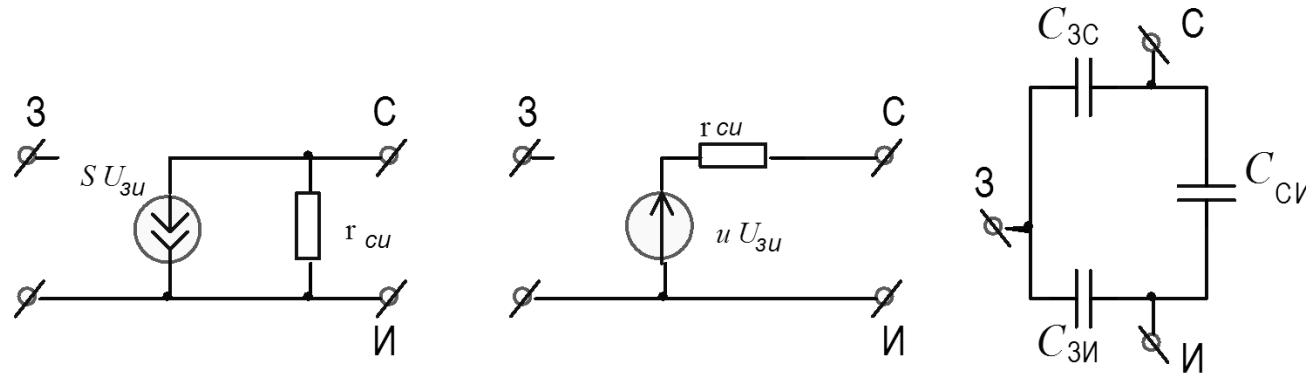


Полевой транзистор с МДП-структурой (MOSFET)



Из-за расположения областей внутри МДП-транзистора возникает паразитный биполярный транзистор. Если вывод от области подложки выполнить отдельно, то это позволит управлять некоторыми характеристиками прибора через этот транзистор, но гораздо чаще подложка соединяется с истоком внутри корпуса транзистора. Это приводит к тому, что между выводами истока и стока возникает диод, образованный р-п-переходом между подложкой и стоком.

Модель полевого транзистора

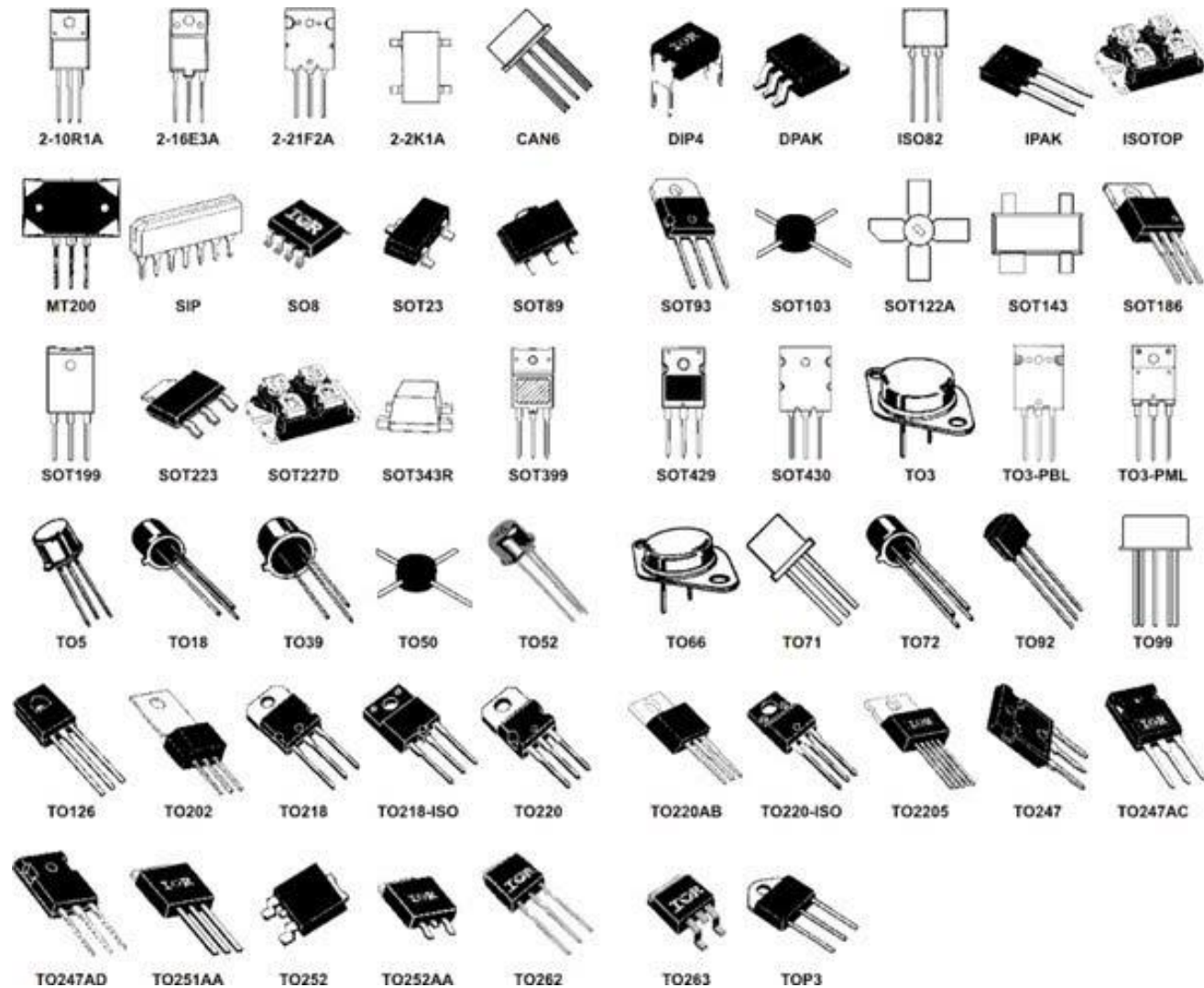


Модели полевого транзистора для линейного и ключевого режимов работы.

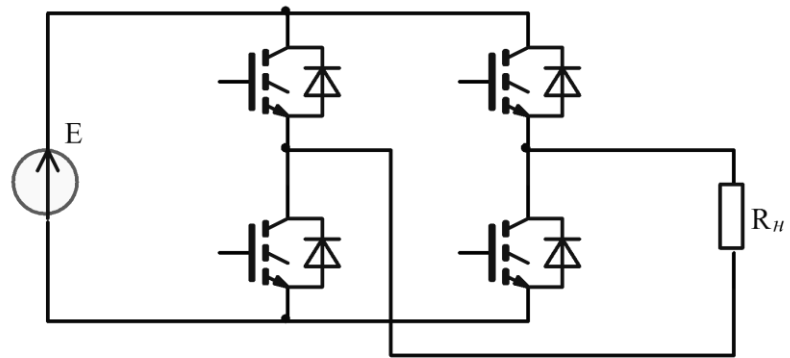
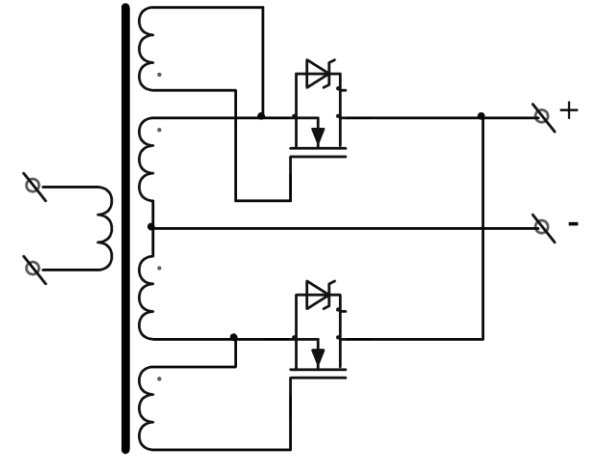
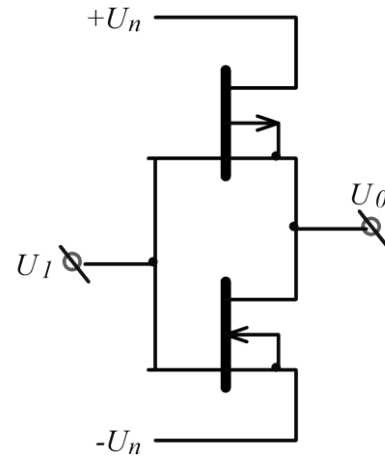
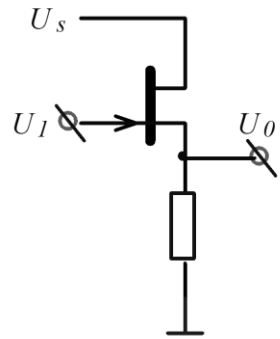
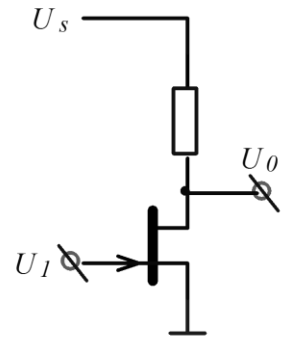
$$S = \frac{dI_c}{dU_{3и}} \quad (U_{cu} = const)$$

$$u = S \cdot r_{cu}$$

Транзисторы

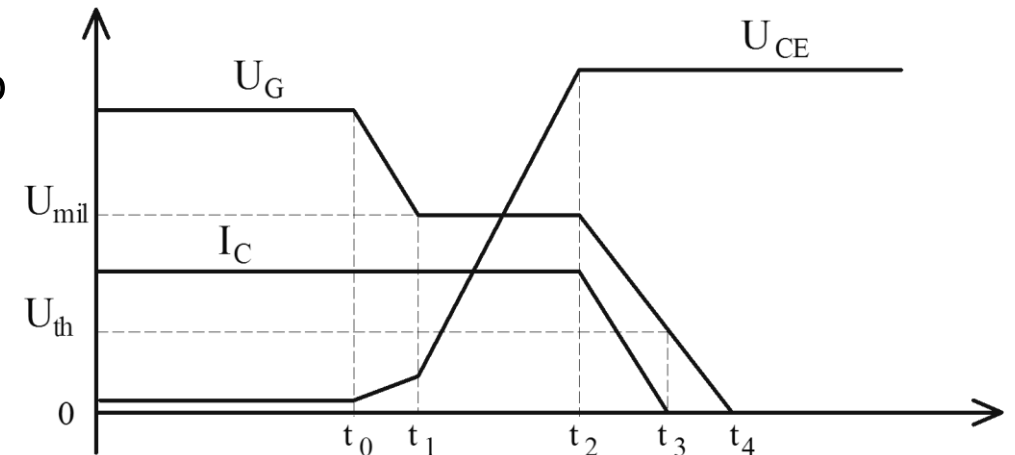
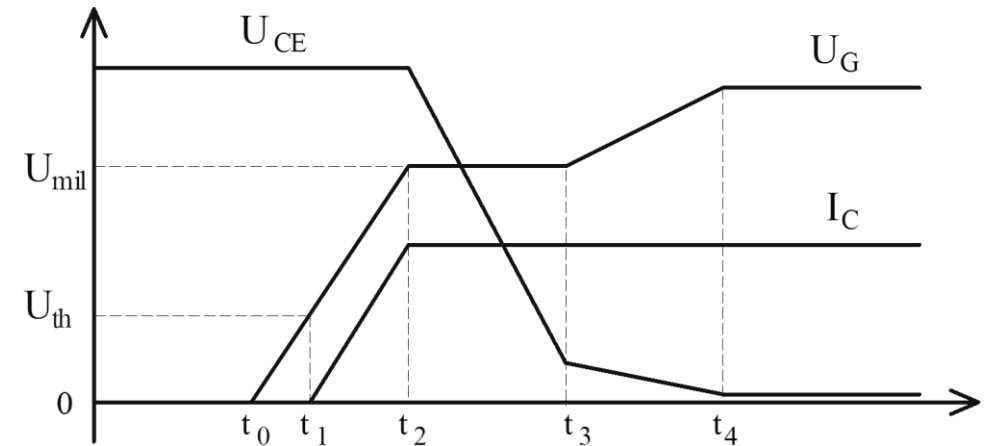


Схемы включения полевых транзисторов и IGBT

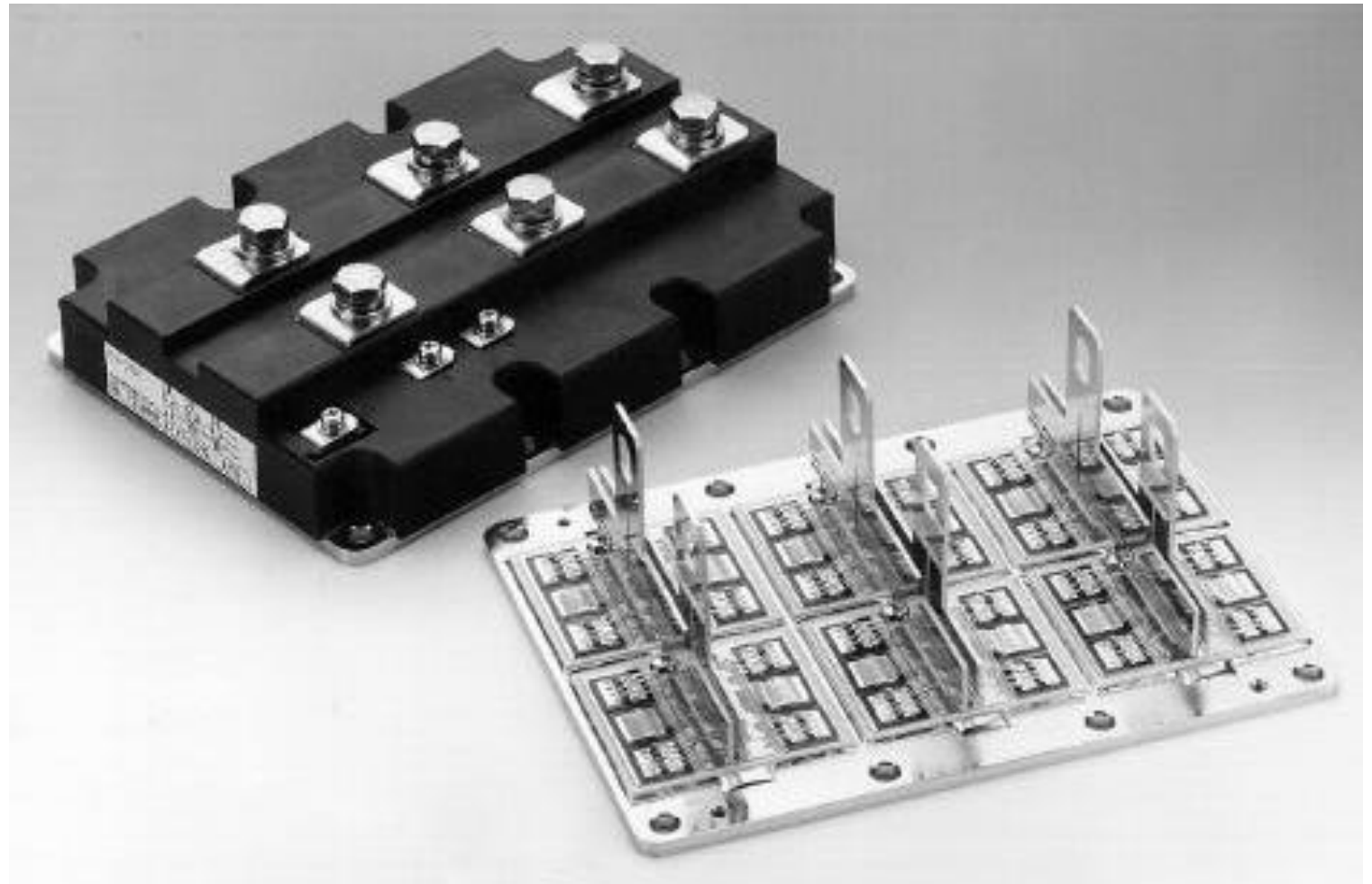
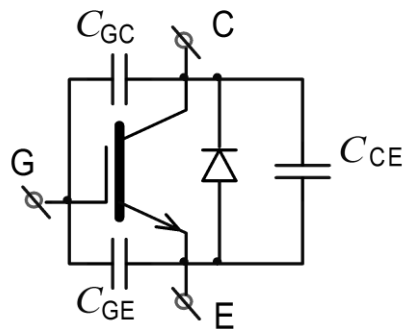
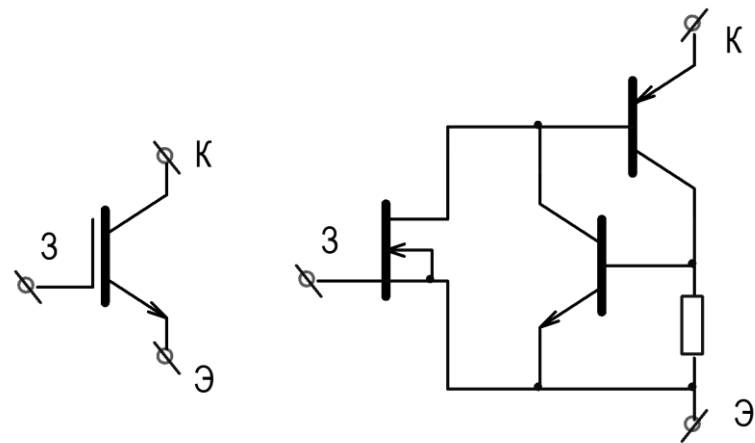


Ключевой режим работы транзистора (IGBT, MOSFET)

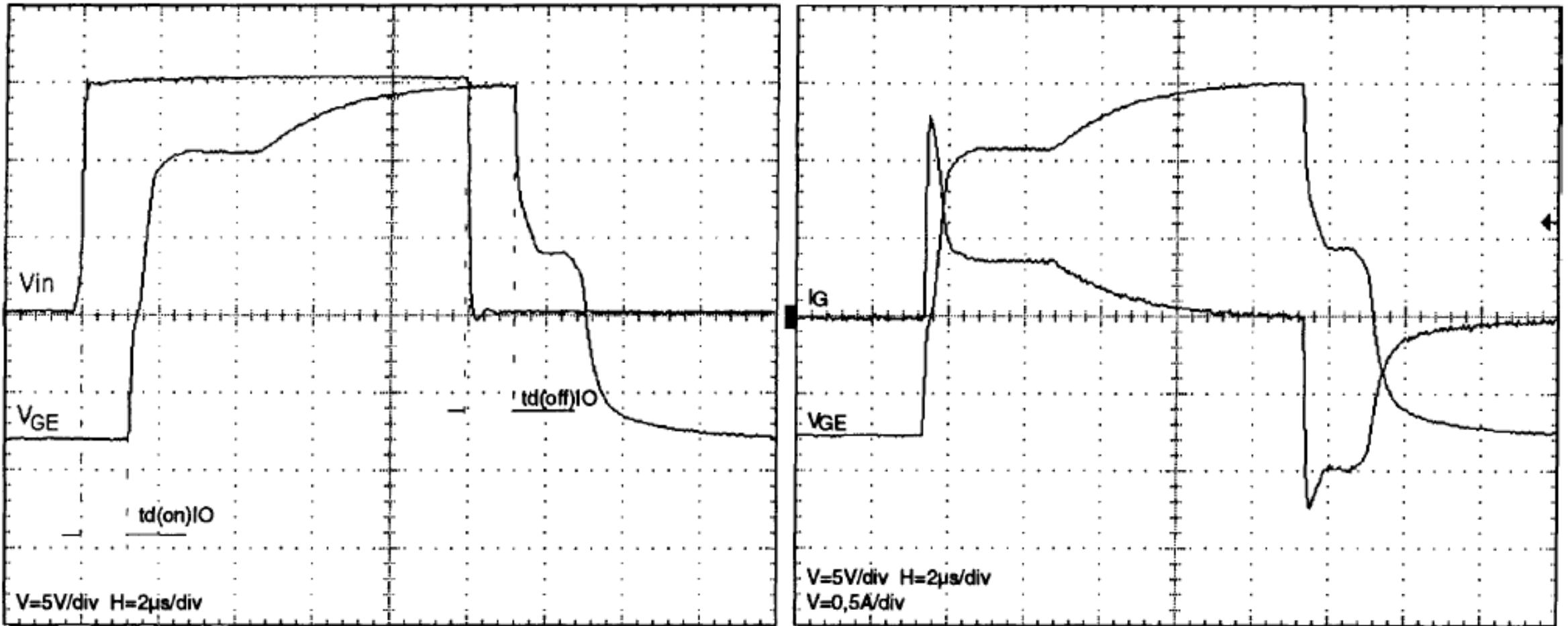
На интервале t_0 - t_1 напряжение затвора (U_G), плавно нарастая, достигает величины отсечки (U_{th}). С момента отсечки через транзистор начинает протекать ток, величина которого определяется напряжением затвора – это линейная область работы. К моменту t_2 ток транзистора достигает максимальной величины, определяемой нагрузкой. До этого момента происходила зарядка входной емкости транзистора C_{GE} . В этот момент напряжение на затворе практически перестает расти до момента t_3 , это явление называется эффектом Миллера. Во время «плато Миллера» происходит перезарядка емкостей C_{GC} и C_{CE} , при этом напряжение на коллекторе уменьшается до значений, близких к напряжению насыщения. Эффективная величина емкости Миллера примерно в 3-5 раз больше входной. По завершении плато Миллера напряжение на затворе еще немного растет – снова заряжается входная емкость и напряжение коллектора достигает минимальных значений, определяемых величиной тока коллектора. Энергетические потери определяются площадью под кривыми тока коллектора и напряжения коллектор-эмиттер.



Биполярный транзистор с изолированным затвором (IGBT)

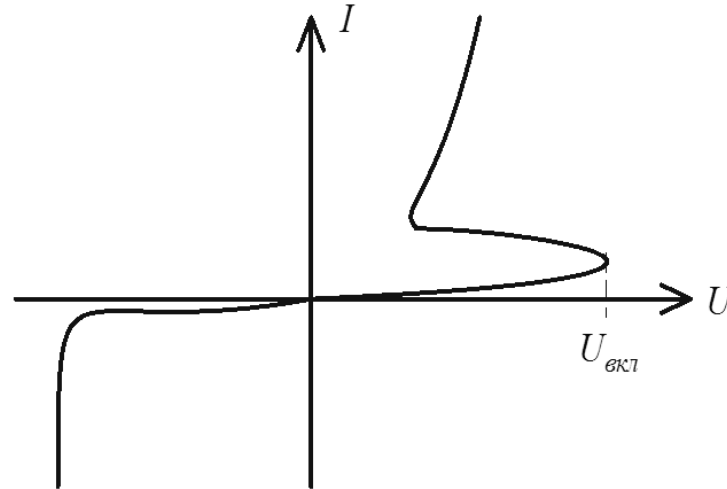
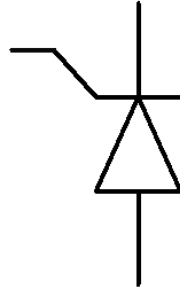
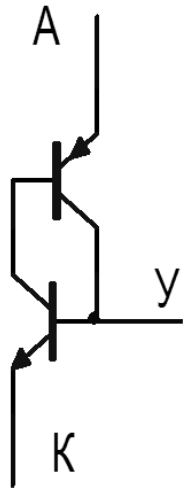
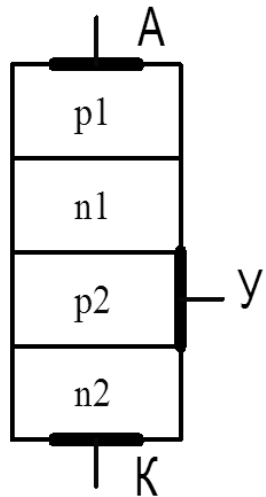


Реальные формы напряжений драйвера, затвора и тока затвора IGBT

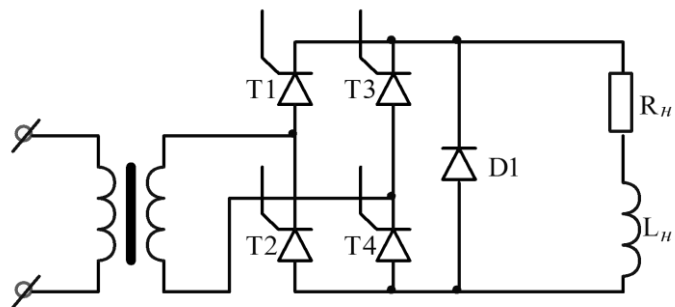


Тиристор

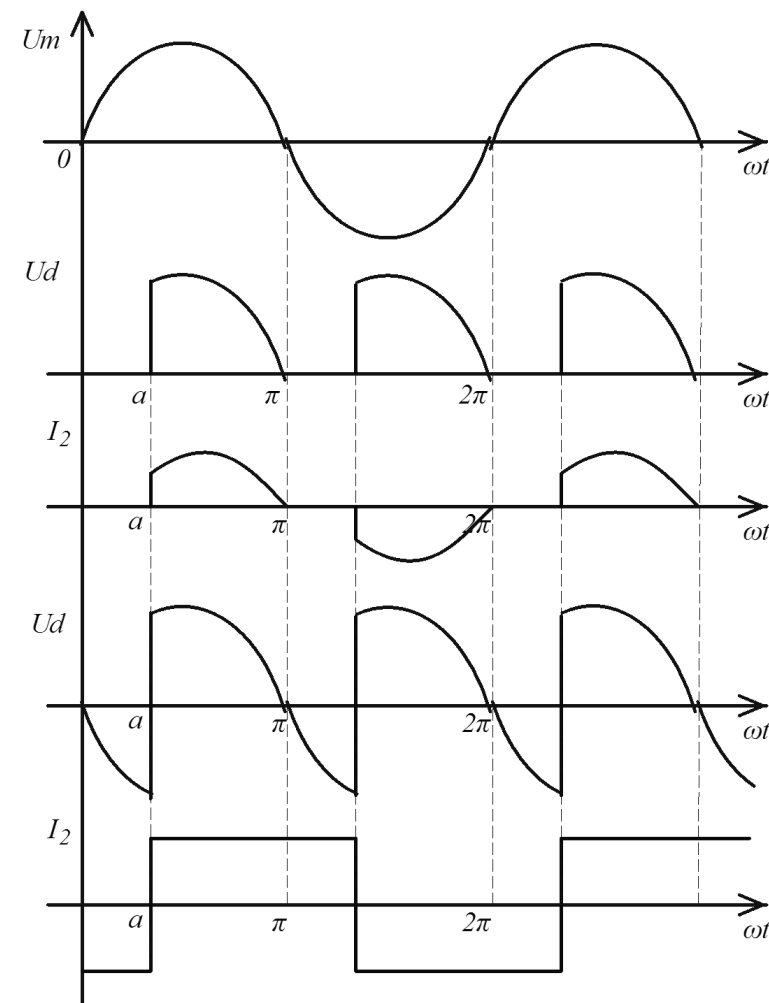
Тиристором называют полупроводниковый прибор с тремя (или более) p - n -переходами. Выделяют диодный (двухвыводной) и триодный (трехвыводной) тиристор.



Управляемый выпрямитель



$$U_d = U_{d0} \cdot \frac{1 + \cos \alpha}{2}$$



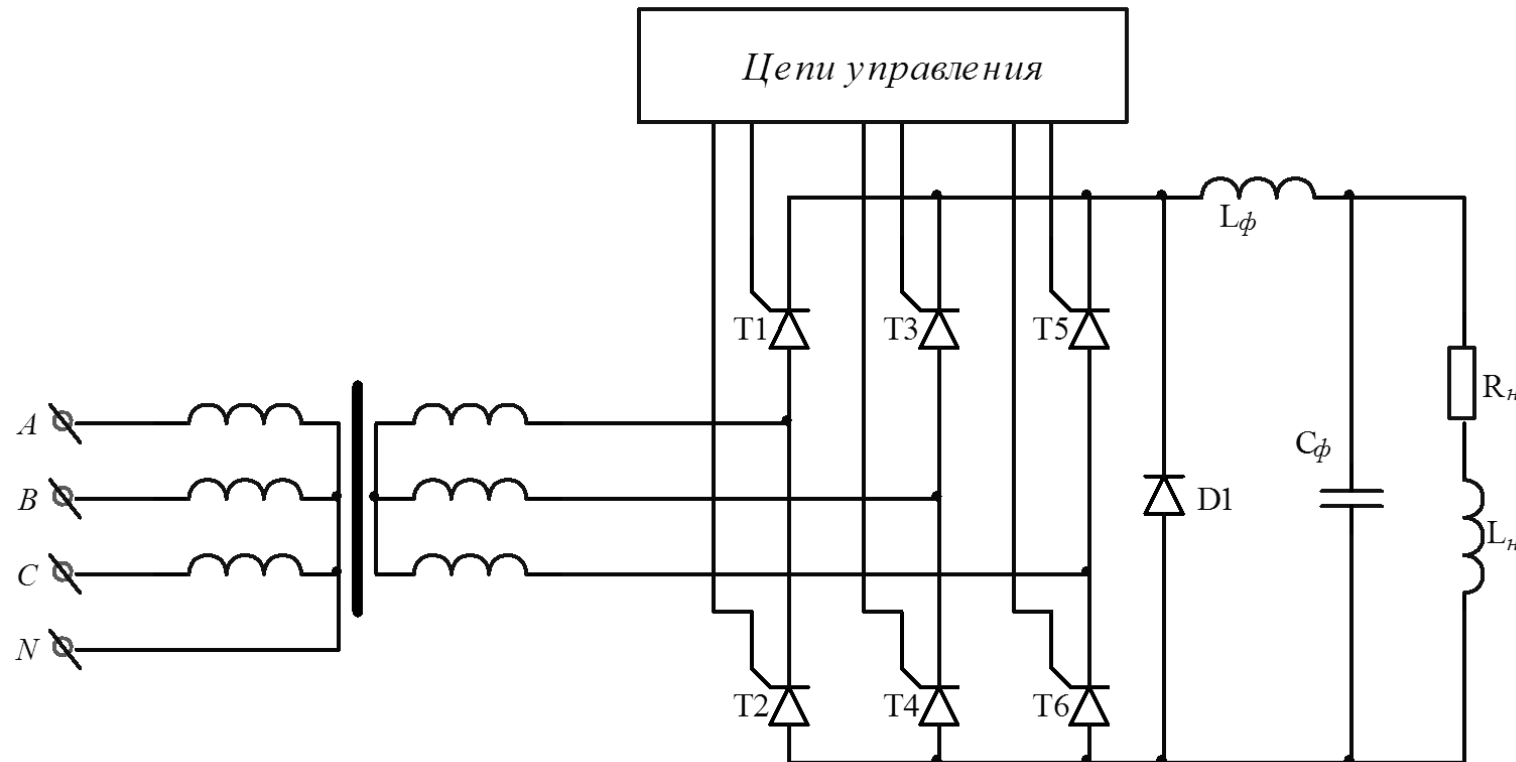
Активная
нагрузка

Индуктивная
нагрузка
без обратного
диода

Трехфазный управляемый выпрямитель

$$U_d = U_{d0} \cdot \cos \alpha, \quad \alpha \leq \pi/3$$

$$U_d = U_{d0} \cdot [1 + \cos(\pi/3 + \alpha)] \quad , \quad \alpha > \pi/3$$

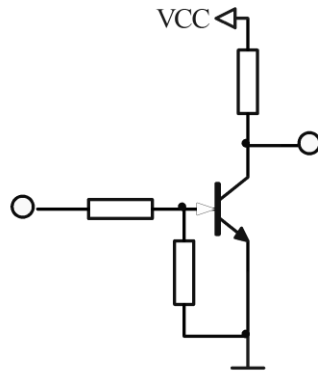


Тиристоры

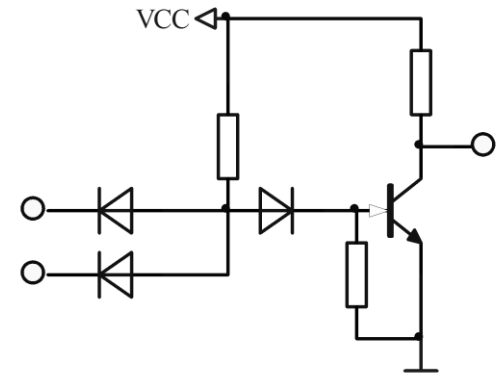


RTL, DTL (резисторно- диодно-транзисторная).

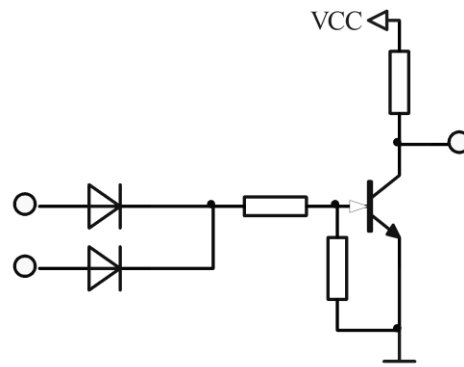
Элемент НЕ:



Элемент 2И-НЕ

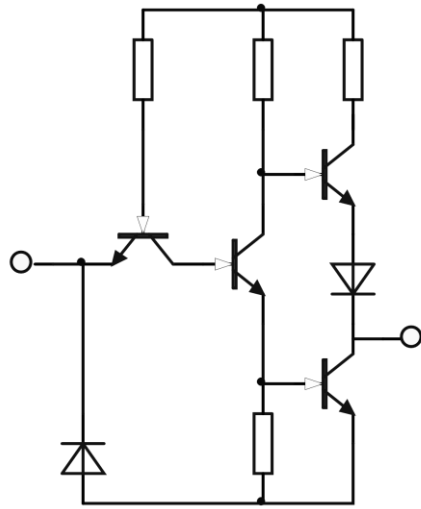


Элемент 2ИЛИ-НЕ

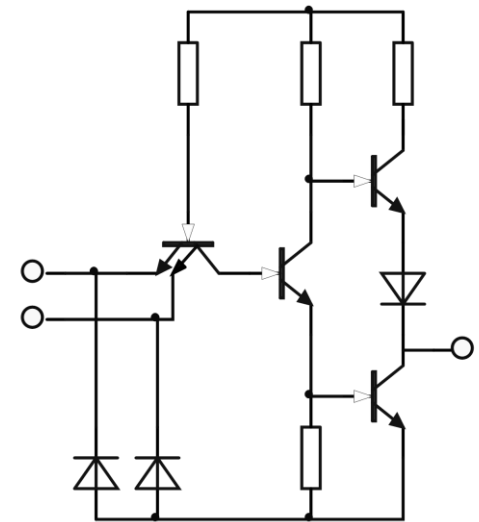


TTL (транзисторно-транзисторная логика).

Элемент НЕ:

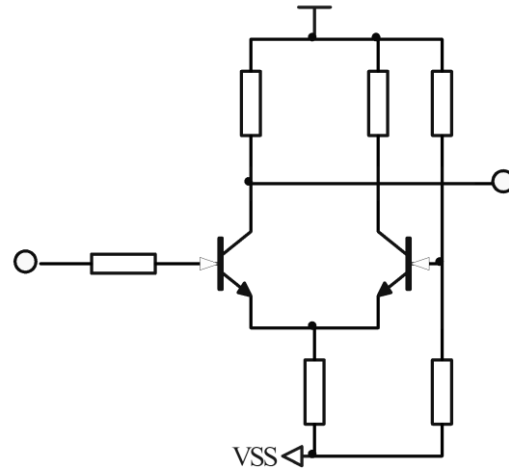


Элемент 2И-НЕ



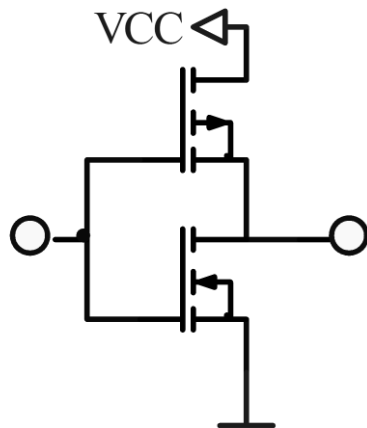
ECL (эмиттерно-связанная логика).

Элемент НЕ:

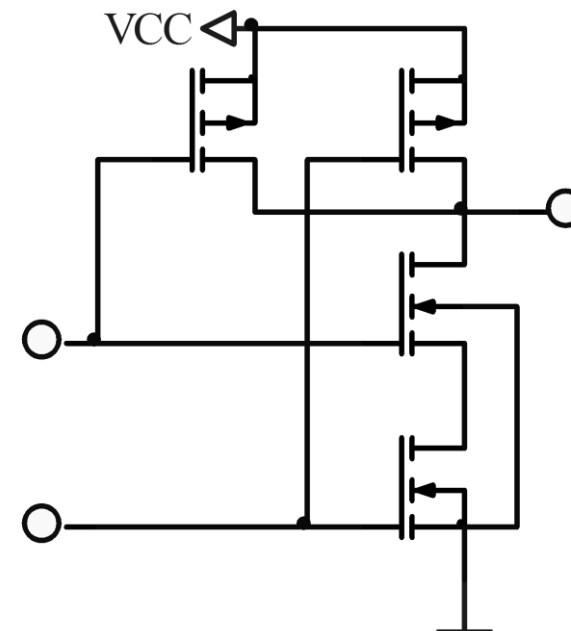


CMOS (транзисторно-транзисторная логика).

Элемент НЕ:



Элемент 2И-НЕ:



Элемент 2ИЛИ-НЕ:

