



МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени Н.Э. БАУМАНА

Учебное пособие

Курс лекций

«Электроника и микроэлектроника»

МГТУ имени Н.Э. Баумана

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени Н.Э. БАУМАНА

Курс лекций

«Электроника и микроэлектроника»

Москва
МГТУ имени Н.Э. Баумана

2012

УДК 681.3.06(075.8)
ББК 32.973-018
И201

Курс лекций «Электроника и микроэлектроника» / Коллектив авторов –
М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – 91 с.: ил.

В курсе лекций рассмотрены основные этапы курса «Электроника и микроэлектроника».

Ил. 39. Табл. 5. Библиогр. 7 назв.

УДК 681.3.06(075.8)

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012

АННОТАЦИЯ

В курсе лекций рассмотрены основные темы курса «Электроника и микроэлектроника» понятие диода, транзистора и составление электрических принципиальных схем с их использование, разновидности диодов и транзисторов, их технические параметры, разновидности и способы решения электротехнических задач при отсутствии необходимые электронных радио элементов.

ANNOTATION

The course of lectures addressed the main themes of the course "Electronics and Microelectronics" concept of the diode, transistor and electrical schematic drawing of their use, types of diodes and transistors, their specifications, varieties and methods of solving electrical problems in the absence of radio neobhodimye electronic elements.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ЛЕКЦИИ	7
ВЫВОДЫ.....	146
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	147

ВВЕДЕНИЕ

Данный конспект лекций составлен на основе лекционного курса, читаемого в МГТУ им. Н.Э. Баумана на кафедре ИУ4 преподавателем Аристов Б. К. Курс лекций рекомендован к выполнению текущих аттестационных мероприятий и подготовки к зачету по предмету «Электроника и микроэлектроника».

**1 ЛЕКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО КУРСУ ЭЛЕКТРОНИКА И
МИКРОЭЛЕКТРОНИКА**

Лекция №1.

«Электроника и микроэлектроника»

Старший преподаватель кафедры «Компьютерные системы и сети» (ИУ6) Аристов Борис Константинович, аудитория 703а.

Литература:

1. Опадчий Ю.Ф., Глудкин О.П., Гуров А.И. Аналоговая и цифровая электроника, Москва, «Горячая линия – Телеком», 2002.
2. Валенко В.С. Полупроводниковые приборы и основы схемотехники электронных устройств. Москва, издательский дом «Додека-XXI» 2001.
3. Забродин Ю.С. Промышленная электроника. Москва, «Высшая школа» 1982.
4. Ровдо А.А. Полупроводниковые диоды и схемы с диодами. Москва, «ЛАЙТ ЛТД», 2000.

Электроника.

Электроника – раздел электротехники, изучающая устройства, основанные на протекании электрического тока в вакууме, газе и твердом теле.

Электроника изучает процессы движения электронов в различных средах: вакууме, газе и твердом теле, различные эффекты, сопровождающие это движение, а также взаимодействие движущихся электронов с электромагнитным полем и излучением. Обычно этим термином обозначают науку о формировании и управлении потоками электронов и электромагнитных излучений (фотонов) в устройствах приема, передачи, обработки и хранения информации.

Электроника представляет собой базу, на основе которой конструируются электронные приборы – устройства, предназначенные для преобразования электромагнитной энергии и изменения параметров энергетических потоков.

Классификация электронных устройств.

1. Аналоговые электронные устройства.
2. Дискретные электронные устройства.
3. Смешанные электронные устройства.

Этапы развития электроники.

1895г. Передача информации без проводов.

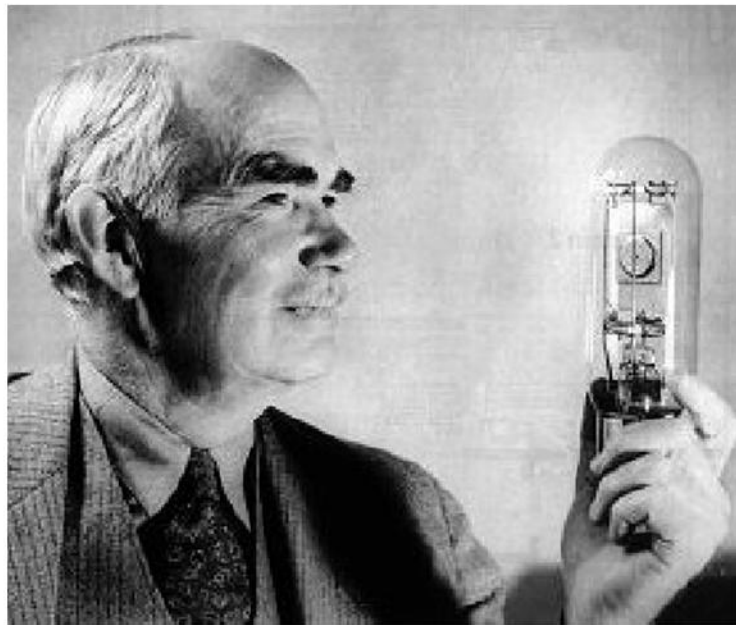
1906 г. Вакуумный триод.

1947г. Транзистор.

1958г. Интегральная микросхема.

1997г. INTEL CPU Pentium-II. 7500000 транзисторов. Техпроцесс – 035мкм.

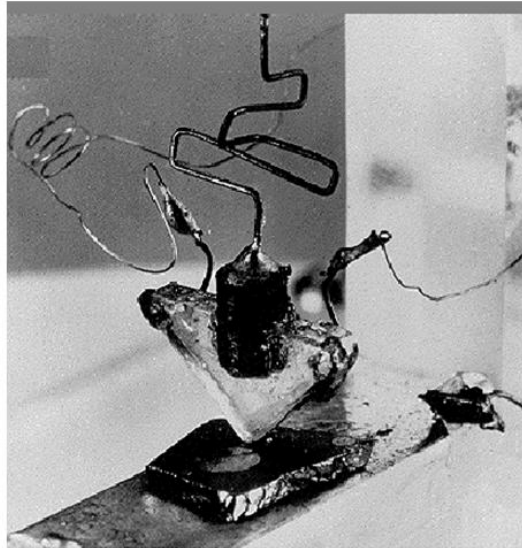
Вакуумные электронные приборы.



Вакуумный триод 1906 год.

Lee De Forest

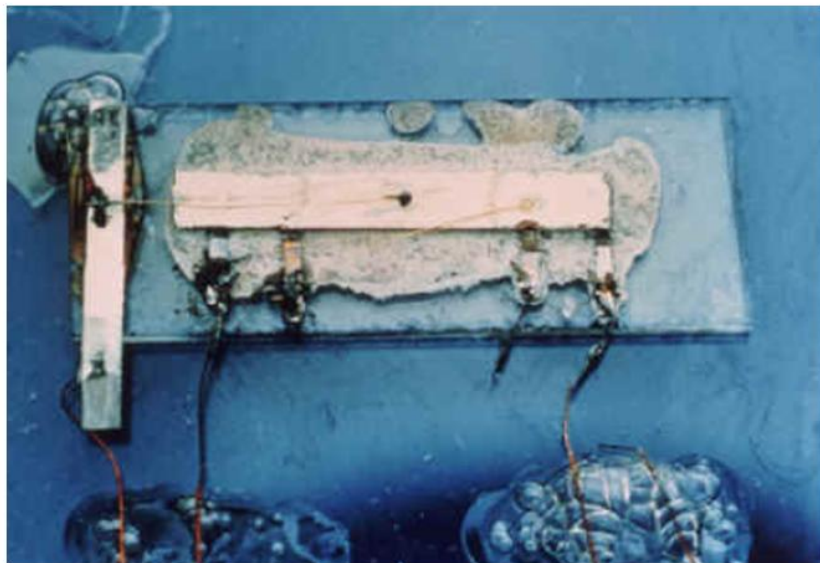
Полупроводниковые приборы.



Первый точечный германиевый транзистор 1947г.

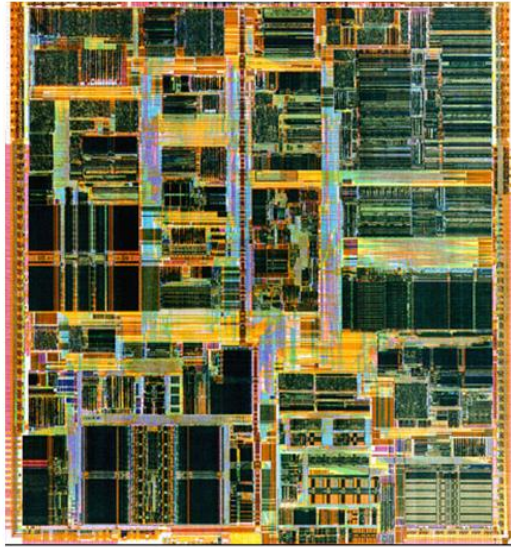
John Bardeen and Walter Brattain
Bell Laboratories

Интегральные микросхемы.

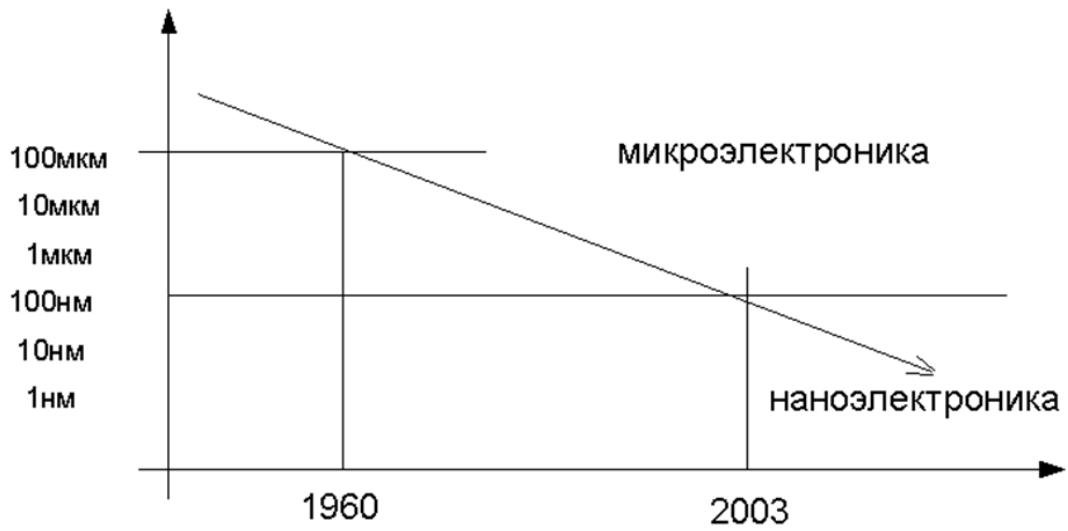


Первая интегральная микросхема (германий)
1958 год

Jack S. Kilby, Texas Instruments



Intel Pentium II, 1997
Частота - 233 МГц. Количество транзисторов - 7.5 миллионов. Техпроцес - 0.35 мкм.



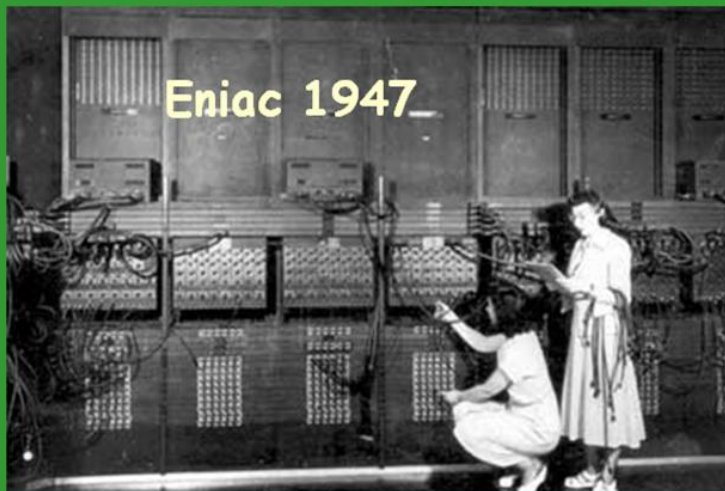
International Technology Roadmap for Semiconductors

	1999	2001	2004	2007	2010	2013
DRAM half-pitch (nm)	180	130	90	65	45	32
Transistors/chip at production (millions)	61	97	193	386	773	1546
MPU cost/function (μ cents/transistor)	120	60	30	15	5.3	1.9

- Rapid scaling requires skilled workforce for processing
 - Interdisciplinary, flexible

Развитие ЭВМ.

ENIAC, the first stored-program electronic computer, 1947. The computer, a small section of which is shown here, contained approximately **18 000 vacuum tubes** and required **174 kilowatts** of power to operate. The Intel 4004 microprocessor of 1971 could perform essentially the same tasks as ENIAC, but required only a **few watts** of power.



ЭЦВМ УРАЛ-2



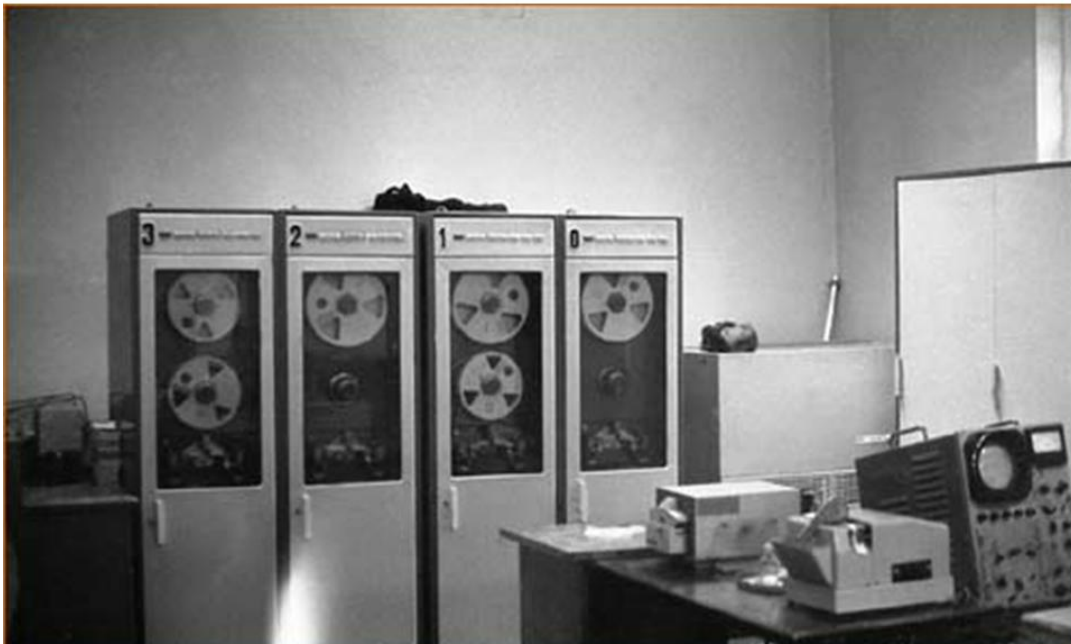
ЭЦВМ Минск-2(22)



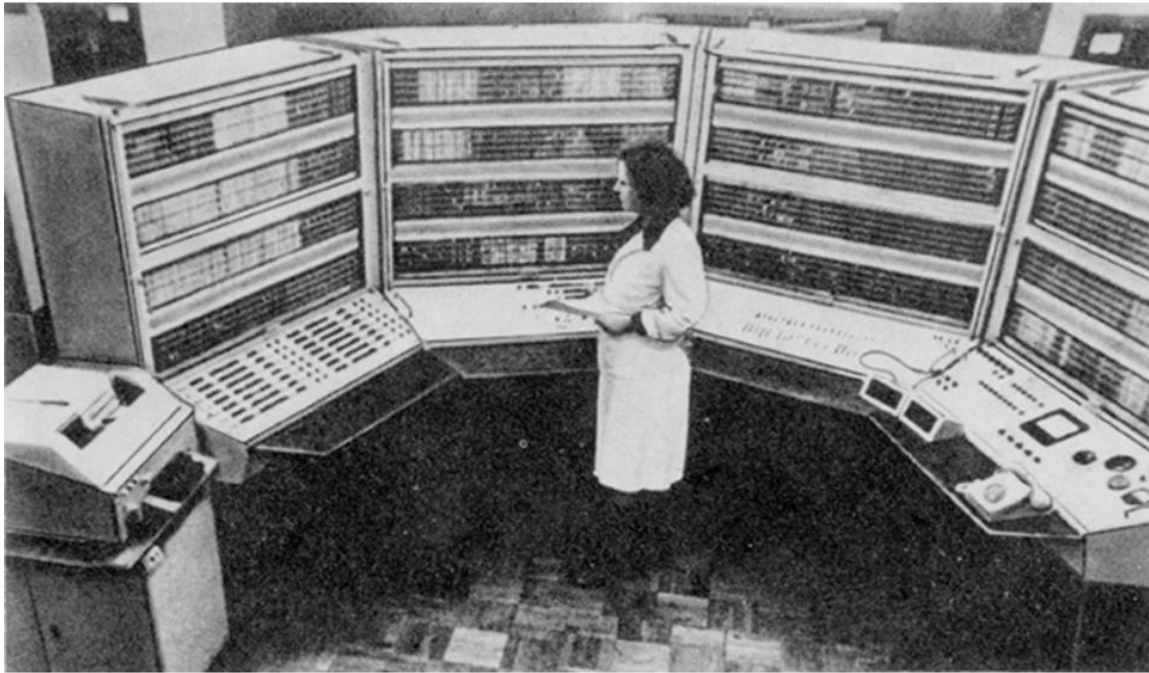
ЭВМ М222



ЭВМ М222



ЭВМ БЭСМ-6



Классификация сигналов.



Периодические синусоидальные сигналы.

Синусоидальным сигналом называется гармонический сигнал, описываемый уравнением вида:

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \Psi_u) \quad \text{для напряжения или}$$

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \Psi_i) \quad \text{для тока.}$$

где $u(t)$ и $i(t)$ - мгновенное значение сигнала напряжения или тока;

U_m и I_m - максимальное (амплитудное) значение функции;

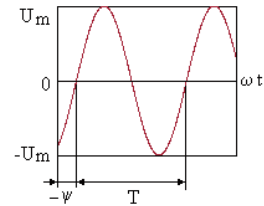
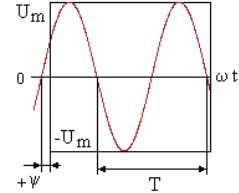
- угловая частота изменения сигнала;

измеряется в радианах за секунду [рад/с].

частота изменения сигнала, измеряется в Герцах [Гц];

T – период функции измеряется в секундах [с];

или - начальная фаза сигнала измеряется в радианах [рад].



Периодические синусоидальные сигналы.

- Эти функции называются временными функциями изменения электрического сигнала.
- Основными характеристиками периодических синусоидальных сигналов являются:
 - Амплитудное значение сигнала U_m или I_m ;
 - Действующее значение сигнала;
 - Среднее значение сигнала
- Действующее значение сигнала за период определяется уравнением:

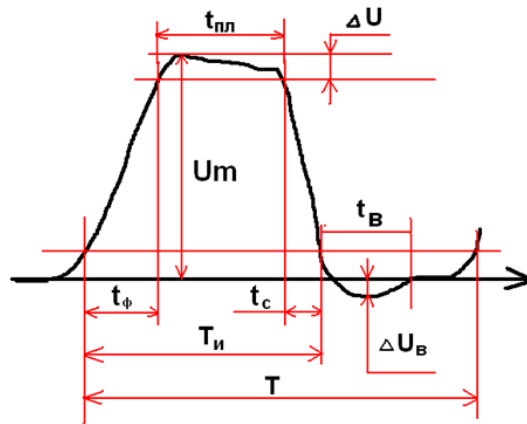
$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (U_m \sin(\omega t + \Psi_u))^2 dt} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$$
- ;
- Коэффициент $k_a = \sqrt{2}$ называется коэффициентом амплитуды.
- Среднее значение сигнала за период определяется уравнением:

$$U_o = \frac{1}{T} \int_0^T U(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T U_m \sin(\omega t + \Psi_u) dt = \frac{2U_m}{\pi}$$
- ;
- Отношение действующего значения сигнала к его среднему значению называется коэффициентом формы:

$$k_f = \frac{U}{U_o} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1.11 \quad ; \text{ (справедливо только для синусоиды).}$$

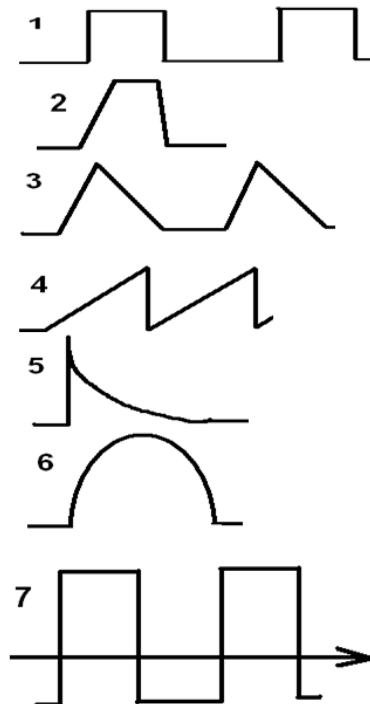
Характеристики импульсного сигнала.

1. Форма импульса.
2. Амплитуда импульса U_m .
3. Фронт импульса t_ϕ .
4. Длительность импульса $t_{пл}$.
5. Длительность спада сигнала t_c .
6. Длительность плоской части сигнала $t_{пл}$.
7. Время обратного выброса t_b .
8. Сквозность импульса $Q = T/T_{и}$.
9. Величина спада вершины импульса $\Delta U_{\%}$.



Несинусоидальные сигналы.

1. Прямоугольный импульс.
2. Трапецеидальный сигнал.
3. Треугольный сигнал.
4. Сигнал пилообразной формы.
5. Экспоненциальный сигнал.
6. Колоколообразный сигнал.
7. Сигнал с чередующейся полярностью.



Основные элементы электрических цепей

- Все элементы можно разделить на две группы:
 1. Активные элементы или источники электрической энергии.
 2. Пассивные элементы или потребители электрической энергии.
 К первой группе относятся источники тока и напряжения.
 Ко второй группе относятся активные и реактивные потребители.
 Графические изображения элементов и их основные параметры показаны в таблице.

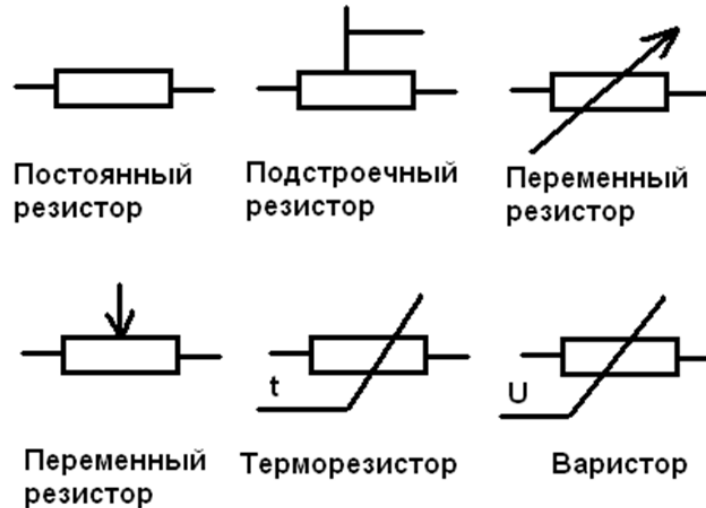
Элемент	Графическое изображение	Параметр	Ед. измерения	Дополнительные ед. измерения
1	2	3	4	5
Источник ЭДС		ЭДС	Вольт (В)	-
Источник тока		Ток	Ампер (А)	-
Резистивный элемент (резистор)		Сопротивление	Ом (ОМ)	1 кОм=10 ³ Ом 1 мОм=10 ⁶ Ом 1 гОм=10 ⁹ Ом
Индуктивный элемент (катушка индуктивности)		Индуктивность	Генри (Гн)	1 мГн=10 ⁻³ Гн 1 мкГн=10 ⁻⁶ Гн
Емкостной элемент (конденсатор)		Емкость	Фарада (Ф)	1 мкФ=10 ⁻⁶ Ф 1 нФ=10 ⁻⁹ Ф 1 пФ=10 ⁻¹² Ф

Классификация резисторов.



Рис.1

Условные графические обозначения резисторов.



Основные параметры резисторов.

1. Номинальное сопротивление по ГОСТ 2825-07.
2. Отклонение сопротивления резистора от номинальной величины.
3. Номинальная мощность рассеивания.
4. Предельное рабочее напряжение.
5. Температурный коэффициент сопротивления (ТКС) резистора – изменение сопротивления резистора при изменении температуры на 1 градус С. $TKC = \frac{\Delta R}{R \Delta t} 100$
6. Уровень собственных шумов.
7. Максимальная температура окружающей среды.
8. Влагостойкость и термостойкость.

Тепловые шумы в резисторах.

У любого резистора имеется тепловой шум – следствие движения носителей заряда внутри твердого тела. Средняя мощность шума определяется по формуле:

$$P_u = 4kT\Delta f$$

k - постоянная Больцмана. $k=1.36 \cdot 10^{-23}$

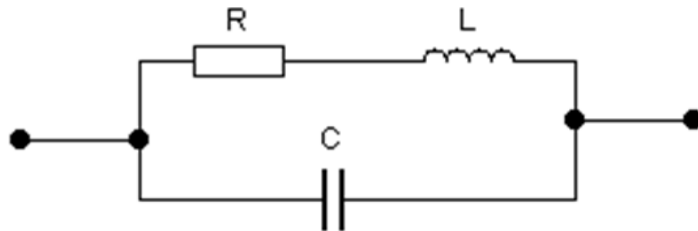
T - абсолютная температура.

Δf - полоса частот, в которой измеряется мощность.

Действующее значение напряжения шумов:

$$P_u = \frac{U_u^2}{R} \quad \rightarrow \quad U_u = \sqrt{4kT\Delta f R}$$

Эквивалентная схема резистора.

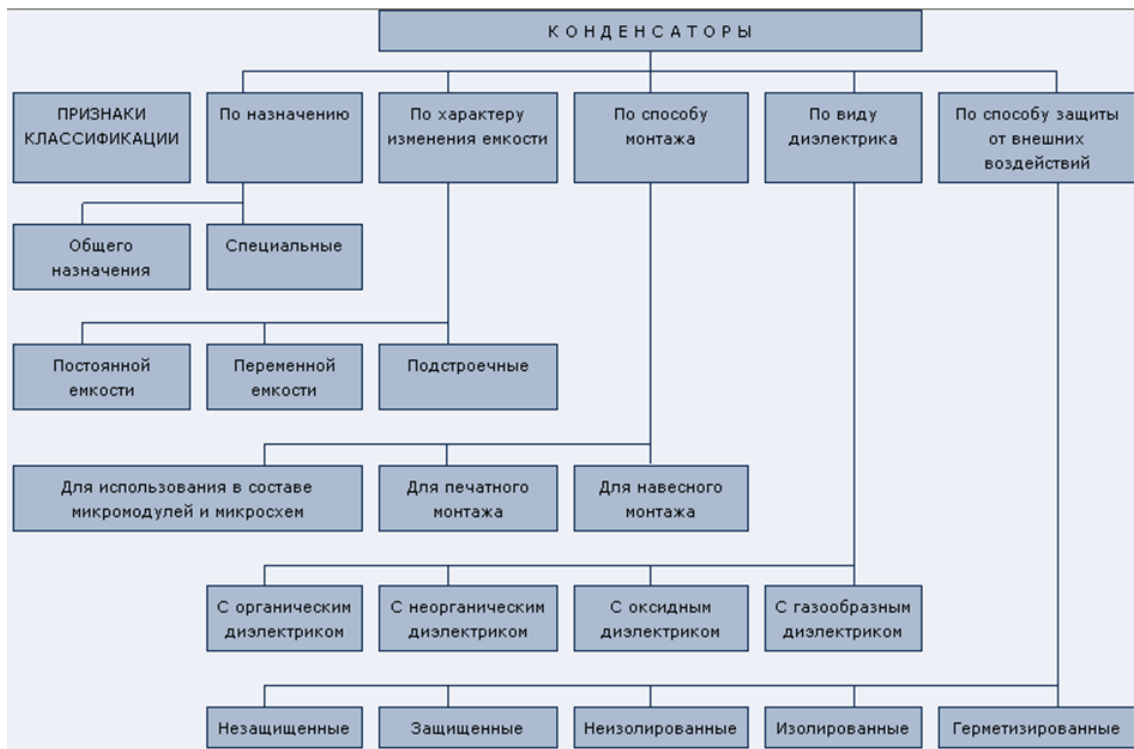


R – сопротивление резистора.

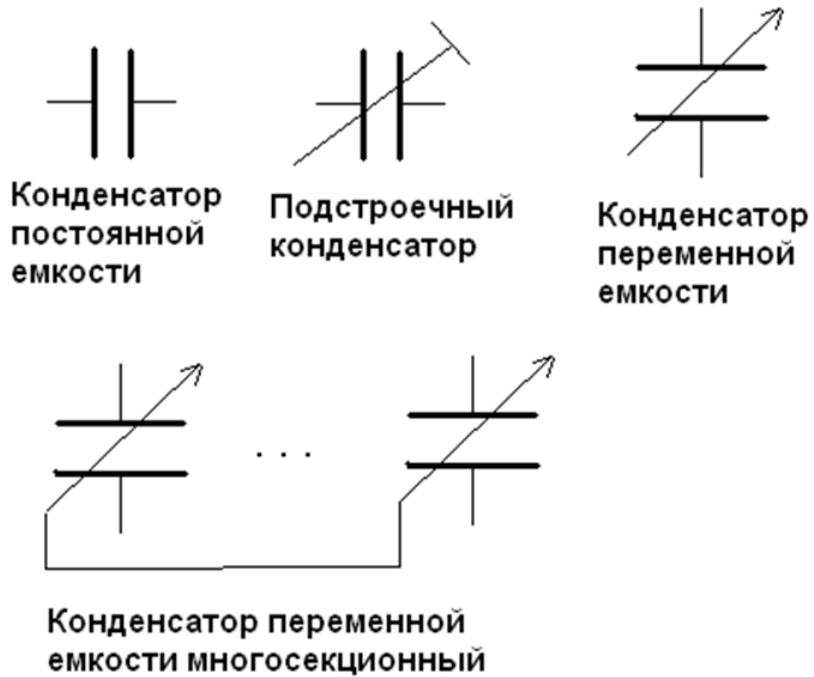
L – индуктивность выводов резистора.

C – емкость между выводами резистора.

Классификация конденсаторов.



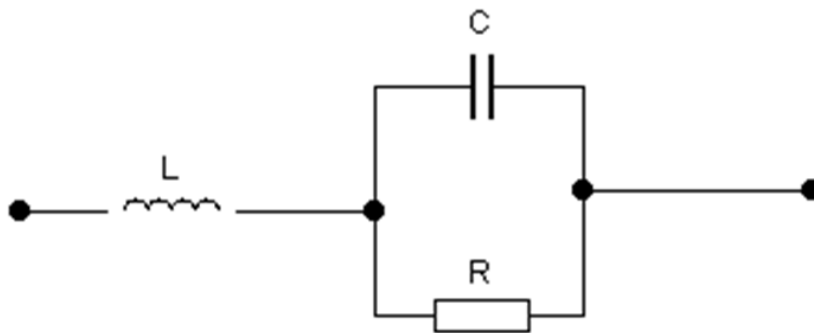
Условные графические обозначения конденсаторов.



Основные параметры конденсаторов.

1. Номинальное значение конденсатора.
2. Допустимое отклонение действительной емкости конденсатора от номинала.
3. Тангенс угла потерь.
4. Ток утечки (для электролитических конденсаторов).
5. Сопротивление изоляции.
6. Температурный коэффициент емкости.
7. Номинальное напряжение.

Эквивалентная схема конденсатора.

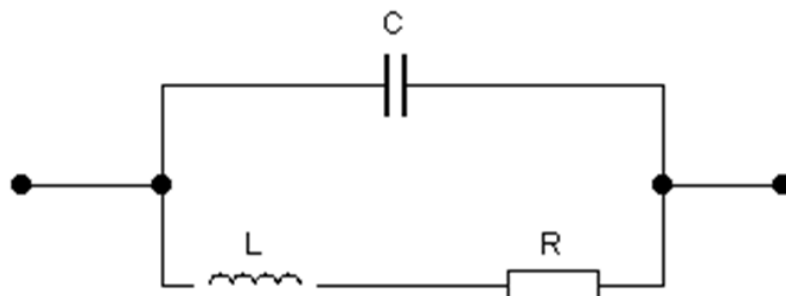


L – индуктивность выводов.

R – омическое сопротивление катушки.

C – емкость конденсатора..

Эквивалентная схема катушки индуктивности.



L – индуктивность катушки.

R – сопротивление катушки.

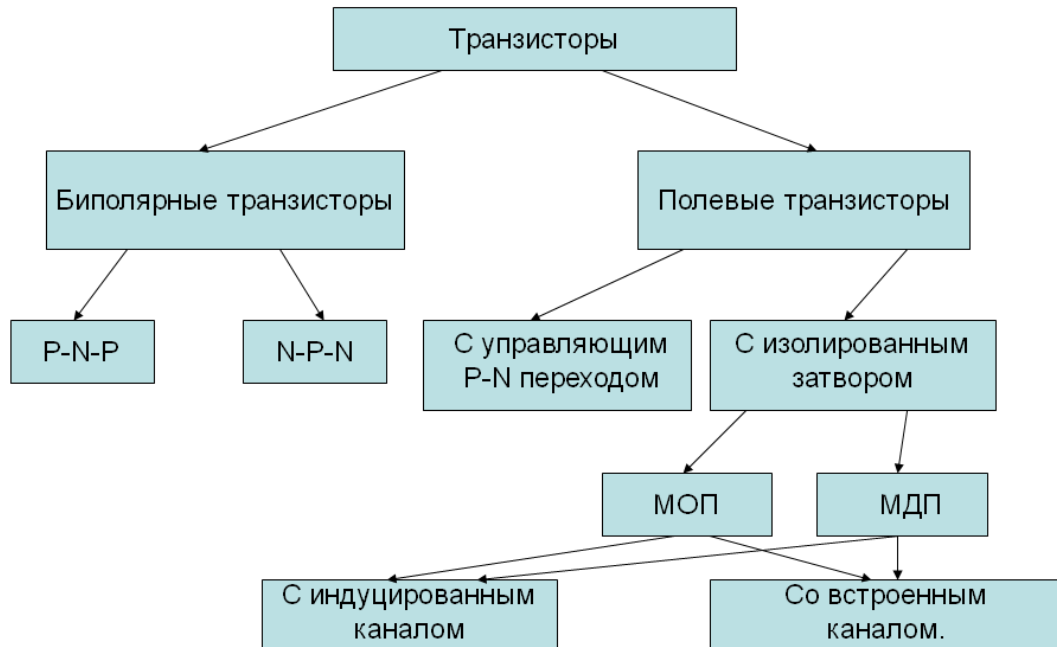
C – емкость между выводами катушки.

Ряд E24

(отклонение от номинала 5%).

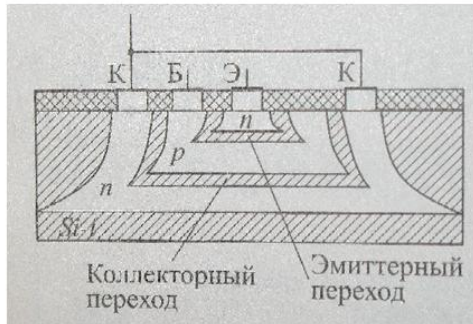
10	36	Номинал резистора (конденсатора) получается умножением числа ряда на 10^{**N} .
11	39	
12	43	
13	47	
15	51	
16	56	
18	62	
20	68	
22	75	
24	82	
27	91	
30		
33		

Классификация транзисторов.



Биполярные транзисторы.

- Устройство, конструктивно-технологические особенности



Планарная N-P-N структура.

Лекция №2

Классификация полупроводниковых приборов.

1. По физическим свойствам.
2. По электрическим параметрам.
3. По конструктивно-технологическим признакам.
4. По полупроводниковому материалу, из которого изготовлен прибор.

Полупроводниковые диоды.

Полупроводниковым диодом называют электронное устройство с одним электрическим переходом и двумя выводами. Полупроводниковый диод использует свойство электронно-дырочного р-п перехода пропускать ток в одном направлении.

К р- и п-областям подключаются (привариваются или припаиваются) металлические выводы. Диод заключается в керамический, металлокерамический, пластмассовый, стеклянный или металлический корпус.

Область кристалла, имеющая наибольшую концентрацию примесей, называется эмиттером. Область с меньшей концентрацией называют базой.

$$P_p \gg P_n$$

P_p – обозначение дырок в р-области.

P_n – обозначение электронов в п-области.

Генерация и рекомбинация свободных носителей заряда.

Уход электрона из ковалентной связи сопровождается появлением двух электрически связанных атомов единичного положительного заряда, получившего название дырки, и свободного электрона. Дырку можно считать подвижным свободным носителем элементарного положительного заряда, а заполнение дырки электроном из соседней ковалентной связи можно представить как перемещение дырки. Процесс образования пар электрон-дырка называют генерацией свободного заряда. Одновременно с процессом генерации протекает процесс рекомбинации носителей.

Генерация и рекомбинация свободных носителей заряда.

Из-за постоянного протекания процессов генерации и рекомбинации носителей зарядов при заданной температуре в полупроводнике устанавливается равновесное состояние, при котором присутствует некоторая концентрация свободных электронов (n_i) и дырок (p_i). В чистом полупроводнике концентрация носителей зарядов зависит от ширины запрещенной зоны и при увеличении температуры возрастает приблизительно по экспоненциальному закону. Равенство концентраций свободных электронов n_i и дырок p_i показывает, что такой полупроводник обладает одинаковыми электронной и дырочной электропроводимостями и называется полупроводником с собственной электропроводимостью или просто собственным полупроводником.

Донорные примеси.

При введении в 4-валентный полупроводник примесных 5-валентных атомов (P, Sb) атомы примеси замещают основные атомы в узлах кристаллической решетки. Четыре электрона атома примеси вступают в связь с четырьмя валентными электронами атома основного полупроводника. Пятый валентный электрон слабо связан с своим атомом и при сообщении ему незначительной энергии, называемой энергией активации, отрывается от атома и становится свободным. Примеси, увеличивающие число свободных электронов, называют донорными. Малая энергия активации примесей (0.01...0.2эВ) при комнатной температуре приводит к полной ионизации 5-валентных атомов примесей и появлению свободных электронов. Появление свободных электронов не сопровождается увеличением количества дырок, в таком полупроводнике концентрация электронов оказывается значительно больше концентрации дырок.

Донорные примеси.

Полупроводники, в которых концентрация свободных электронов больше концентрации дырок, называются полупроводниками с электронной электропроводимостью или полупроводниками n-типа.

Подвижные носители заряда, преобладающие в полупроводнике, называют основными. Те носители заряда, которые находятся в меньшем количестве, называют неосновными для данного типа полупроводника. В полупроводнике n-типа основными носителями заряда являются электроны, а неосновными – дырки.

Акцепторные примеси.

Если в кристалле 4-валентного элемента часть атомов замещена атомами 3-валентного элемента (Ga, In), то для образования четырех ковалентных связей у примесного атома не хватает одного электрона. Этот электрон может быть получен от атома основного элемента полупроводника за счет разрыва ковалентной связи. Разрыв связи приводит к появлению дырки. Примеси, захватывающие валентные электроны, называются акцепторными.

Акцепторные примеси.

Ввиду малого значения энергии активации акцепторов при комнатной температуре многие валентные электроны переходят на уровни акцепторов. Эти электроны, превращая примесные атомы в отрицательные ионы, теряют способность перемещаться по кристаллической решетке, а образовавшиеся при этом дырки могут участвовать в создании электрического тока.

За счет ионизации атомов исходного материала часть валентных электронов становится свободной. Свободных электронов меньше, чем дырок. Дырки в таких полупроводниках являются основными, а электроны – неосновными подвижными носителями заряда. Такие полупроводники называются полупроводниками с дырочной электропроводностью или полупроводниками *p-типа*.

Дрейфовый ток.

Подвижность носителей заряда.

В полупроводнике свободные электроны и дырки находятся в состоянии хаотического движения. Если выбрать в объеме такого полупроводника произвольное сечение и подсчитать количество носителей зарядов, проходящих через это сечение за единицу времени слева направо справа налево, значения этих чисел окажутся одинаковыми. Следовательно ток в данном объеме полупроводника отсутствует. При помещении полупроводника в электрическое поле на хаотическое движение носителей заряда накладывается составляющая направленного движения. Направленное движение зарядов в электрическом поле обуславливает появление тока, называемого дрейфовым. Из-за столкновения носителей заряда с атомами кристаллической решетки их движение в направлении действия электрического тока становится прерывистым. Такое движение характеризуется средней скоростью движения носителей зарядов в направлении действия электрического поля. Средняя скорость движения носителей зарядов в поле единичной напряженности называется подвижностью.

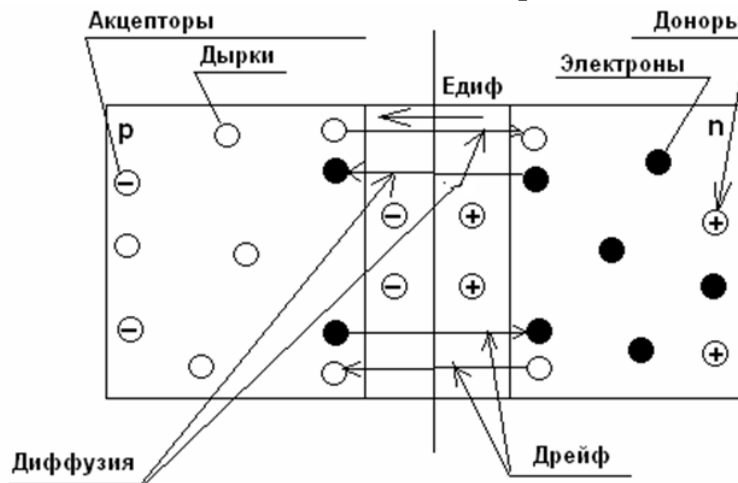
Неравновесные носители зарядов. Диффузионный ток.

Кроме теплового возбуждения, приводящего к равновесной концентрации зарядов, равномерно распределенных по объему полупроводника, обогащение полупроводника электронами и дырками может осуществляться различными внешними воздействиями. В этом случае энергия возбуждения передается непосредственно носителям заряда, а тепловая энергия кристаллической решетки остается практически постоянной. Следовательно, избыточные носители заряда не находятся в тепловом равновесии с решеткой и поэтому называются неравновесными. В отличие от равновесных носителей, они могут неравномерно распределяться по объему полупроводника.

Неравновесные носители зарядов. Диффузионный ток.

После прекращения действия возбудителя за счет рекомбинации электронов и дырок концентрация избыточных носителей быстро убывает и достигает равновесного значения. Носители зарядов рекомбинируют в объеме полупроводника и на его поверхности. Неравномерное распределение неравновесных носителей зарядов сопровождается их диффузией в сторону меньшей концентрации. Это движение носителей зарядов обуславливает прохождение электрического тока, называемого диффузионным.

Электронно-дырочный p-n переход в состоянии равновесия.



Электронно-дырочный p-n переход в состоянии равновесия.

На границе p-n перехода имеет место скачкообразное изменение концентраций донорных и акцепторных примесей, их концентрации в p и n областях сильно различаются. Поэтому на границе областей происходит диффузия электронов из n-области в p-область, а дырок из p-области в n-область. Такое движение зарядов создает диффузионный ток электронов и дырок. Электроны и дырки, проходя через контакт, оставляют в приконтактной области дырочного полупроводника нескомпенсированный заряд отрицательных ионов акцепторных примесей, а в электронном полупроводнике – нескомпенсированный заряд положительных донорных ионов. В связи с этим электронный полупроводник будет заряжен положительно, дырочный – отрицательно. Между областями с различным типом электропроводимости возникает диффузионное электрическое поле, созданное двумя слоями объемных зарядов. Этому полю соответствует разность потенциалов между n- и p-областями, называемая контактной. За пределами области объемного заряда полупроводники n- и p-типа остаются электрически нейтральными.

Электронно-дырочный р-п переход в состоянии равновесия.

Диффузионное электрическое поле является тормозящим для основных носителей заряда и ускоряющим для неосновных. Электроны р-области и дырки п-области, совершая тепловое движение, попадают в пределы диффузионного электрического поля, увлекаются им и перебрасываются в противоположные области, образуя ток дрейфа или ток проводимости. Выведение носителей заряда из области полупроводника, где они являются неосновными, через р-п переход ускоряющим электрическим полем называется экстракцией носителей заряда.

Прямое и обратное включение перехода.

При использовании р-п перехода в реальных полупроводниковых приборах к нему подводится внешнее напряжение. Величина и полярность этого напряжения определяют поведение перехода и проходящий через него электрический ток. Если положительный полюс источника напряжения подключается к р-области, а отрицательный к п-области, то такое включение называется прямым. Если полярность источника напряжения противоположная то такое включение называют обратным.

Прямое включение р-п перехода.

При прямом включении р-п перехода внешний источник напряжения создает в переходе поле, которое противоположно по направлению внутреннему диффузионному полю. Напряженность результирующего поля падает и запирающей слой сужается. В результате этого большое количество основных носителей зарядов получает возможность диффузионно переходить в соседнюю область, т.е. через переход потечет результирующий ток, определяемый в основном, диффузионной составляющей. Ток дрейфа при этом не изменится, поскольку он зависит от количества неосновных носителей заряда, появляющихся на границе перехода. Диффузионный ток зависит от высоты потенциального барьера и по мере его снижения увеличивается экспоненциально.

Прямое включение р-п перехода.

Повышенная диффузия носителей зарядов через переход вызовет повышение концентрации дырок в области n-типа и электронов в области р-типа. Такое повышение концентрации неосновных носителей вызванное влиянием внешнего напряжения, приложенное к переходу, называется инжекцией неосновных носителей. Неравновесные неосновные носители диффундируют вглубь полупроводника и нарушают его электронейтральность. Восстановление нейтрального состояния полупроводника происходит за счет поступления носителей зарядов от внешнего источника. Это является причиной возникновения тока во внешней цепи, называемого прямым.

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) диода.

ВАХ диода описывается выражением:

$$I = I_0 [\exp(U_d / \varphi_T) - 1]$$

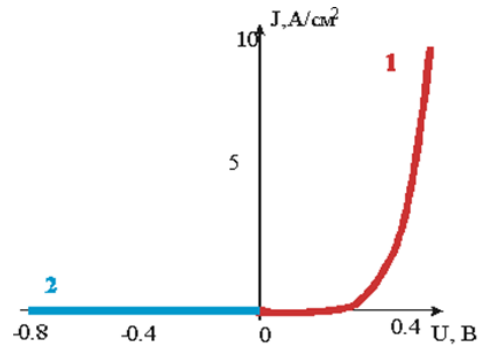
Где:

I - ток, протекающий через диод

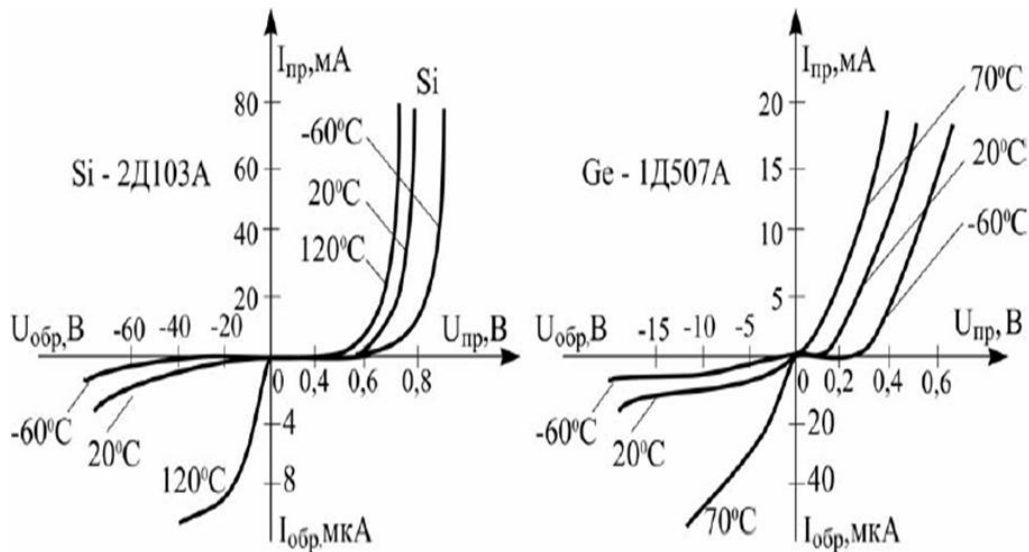
U_d - напряжение на р-п переходе

φ_T - тепловой потенциал равный kT/q . $\approx 0.025\text{В}$

I_0 - ток насыщения.



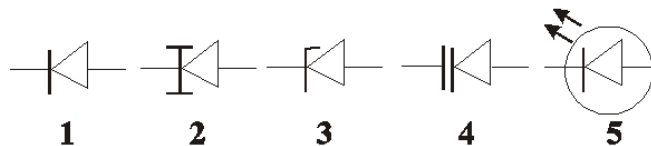
ВАХ кремниевого и германиевого диодов.



Разновидности диодов.

1. Выпрямительные.
2. Выпрямительные столбы.
3. Диоды СВЧ.
4. Туннельные.
5. Стабилитроны.
6. Варикапы.
7. Излучательные.
8. Фотоприемники.

Условные графические обозначения диодов.

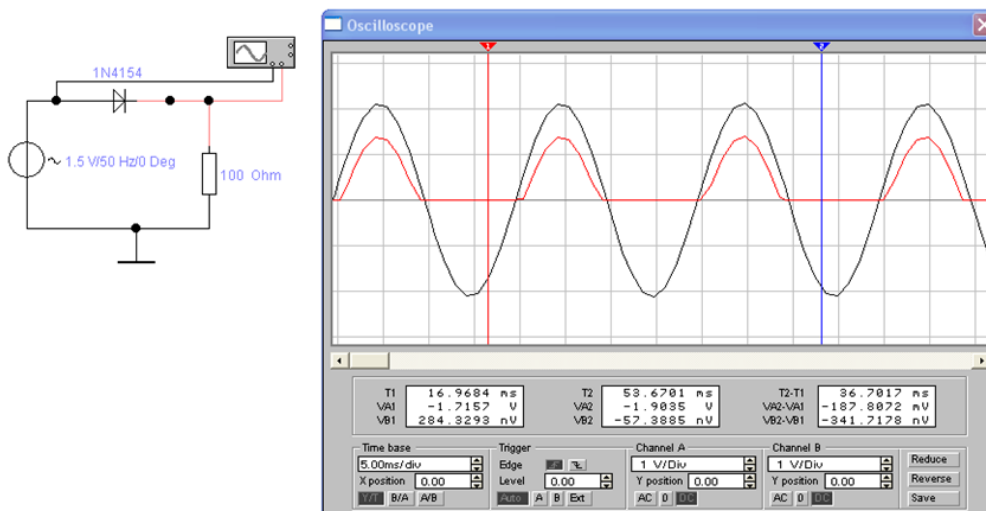


- 1 - выпрямительный и детектирующий диод,
- 2 - туннельные диод,
- 3 – стабилитрон и стабистор,
- 4 - варикап (полупроводниковая переменная емкость),
- 5 - светоизлучающий диод (светодиоды).

Лекция №3.

Источники питания электронной аппаратуры.

1. Первичные источники питания.
2. Вторичные источники питания.



Система условных обозначений отечественных диодов.

Система условных обозначений современных типов диодов установлена отраслевым стандартом ОСТ 11 336.919-81. В основу системы обозначений положен буквенно-цифровой код.

Первый элемент обозначает исходный полупроводниковый материал, из которого изготовлен диод. Используются буквы или цифры:

Г или 1 - германий или его соединения;

К или 2 - кремний или его соединения;

А или 3 - соединения галлия;

И или 4 - соединений индия.

Второй элемент - буква, определяющая подкласс (или группу) прибора.

Д - диоды выпрямительные, импульсные, магнитодиоды, термодиоды;

И - туннельные диоды;

А - сверхвысокочастотные диоды;

Ц - выпрямительные столбы и блоки;

В - варикапы;

С - стабилитроны (включая стабисторы и ограничители);

Г - генераторы шума;

Система условных обозначений отечественных диодов.

Третий элемент - цифра, определяющая функциональные возможности диода.

Подкласс Д - диоды выпрямительные, импульсные, магнитодиоды, термодиоды:

1 - для выпрямительных диодов с постоянным или средним значением прямого тока не более 0,3 А;

2 - для выпрямительных диодов с постоянным или средним значением прямого тока от 0,3 А до 10А;

3 - для магнитодиодов, термодиодов и прочих диодов;

4 - для импульсных диодов с временем восстановления обратного сопротивления более 500 нс;

5 - для импульсных диодов с временем восстановления от 150 до 500 нс;

6 - для импульсных диодов с временем восстановления от 30 до 150 нс;

7 - для импульсных диодов с временем восстановления от 5 до 30 нс;

8 - для импульсных диодов с временем восстановления от 1 до 5 нс;

9 - для импульсных диодов с эффективным временем жизни неосновных носителей заряда менее 1 нс.

Система условных обозначений отечественных диодов.

Подкласс И - туннельные диоды:

- 1 - для усилительных туннельных диодов;
- 2 - для генераторных туннельных диодов;
- 3 - для переключательных туннельных диодов;
- 4 - для обращенных диодов.

Подкласс А - сверхвысокочастотные диоды:

- 1 - для смесительных диодов;
- 2 - для детекторных диодов;
- 3 - для усилительных диодов;
- 4 - для параметрических диодов.
- 5 - для переключательных и ограничительных диодов;
- 6 - для умножительных и настроечных диодов;
- 7 - для генераторных диодов;
- 8 - для импульсных диодов.

Система условных обозначений отечественных диодов.

**Подкласс Д - выпрямительные столбы и
блоки:**

- 1 - для столбов с постоянным или средним значением прямого тока не более 0,3 А;
- 2 - для столбов с постоянным или средним значением прямого тока от 0,3 до 10 А;
- 3 - для блоков с постоянным или средним значением прямого тока не более 0,3 А;
- 4 - для блоков с постоянным или средним значением прямого тока от 0,3 до 10 А;

Подкласс В - варикапы:

- 1 - для подстроечных варикапов;
- 2 - для умножительных варикапов.

Система условных обозначений отечественных диодов.

Подкласс С - стабилитроны:

- 1 - для стабилитронов мощностью не более 0,3 Вт с номинальным напряжением стабилизации менее 10 В;
- 2 - для стабилитронов мощностью не более 0,3 Вт с номинальным напряжением стабилизации от 10 до 100 В;
- 3 - для стабилитронов мощностью не более 0,3 Вт с номинальным напряжением стабилизации более 100 В;
- 4 - для стабилитронов мощностью от 0,3 до 5 Вт с номинальным напряжением стабилизации менее 10 В;
- 5 - для стабилитронов мощностью от 0,3 до 5 Вт с номинальным напряжением стабилизации от 10 до 100 В;
- 6 - для стабилитронов мощностью от 0,3 до 5 Вт с номинальным напряжением стабилизации более 100 В;
- 7 - для стабилитронов мощностью от 5 до 10 Вт с номинальным напряжением стабилизации менее 10 В;
- 8 - для стабилитронов мощностью от 5 до 10 Вт с номинальным напряжением стабилизации от 10 до 100 В;
- 9 - для стабилитронов мощностью от 5 до 10 Вт с номинальным напряжением стабилизации более 100 В;

Система условных обозначений отечественных диодов.

Подкласс Г- генераторы шума:

- 1 - для низкочастотных генераторов шума;
- 2 - для высокочастотных генераторов шума;

Четвертый элемент - число, обозначающее порядковый номер разработки диода.

Пятый элемент - буква, условно определяющая классификацию диодов по параметрам. Для бескорпусных приборов в состав обозначения дополнительно через дефис вводится цифра, характеризующая соответствующую модификацию конструктивного исполнения;

- 1 - с гибкими выводами без кристаллодержателя (подложки);
- 2 - с гибкими выводами на кристаллодержателе (подложке);
- 3 - с жесткими выводами без кристаллодержателя (подложки);
- 4 - с жесткими выводами на кристаллодержателе (подложке);
- 5 - с контактными площадками без кристаллодержателя (подложки) и без выводов;
- 6 - с контактными площадками на кристаллодержателе (подложке) и без выводов;

буква Р после последнего элемента обозначения - для СВЧ диодов с парным подбором;

буква Г – с подбором четверки;

буква К – с подбором шестерки.

Общие свойства и параметры диодов.

1. Статические параметры описывают поведение приборов на постоянном токе.
2. Динамические параметры характеризуют частотно-временные свойства приборов.
3. Предельно-эксплуатационные параметры приборов определяют область надежной и устойчивой работы прибора.

Для некоторых параметров может быть указан «разброс».

Различают общие параметры диодов, характеризующие все полупроводниковые диоды и специальные параметры диодов, характеризующие только отдельные виды диодов.

Общие свойства и параметры диодов.

1. Рассеиваемая мощность.

$P_{пр}$ - рассеиваемая диодом мощность при включении диода в прямом направлении,

$P_{обр}$ - рассеиваемая диодом мощность при включении диода в обратном направлении,

$P_{ср}$ - средняя рассеиваемая мощность,

$P_{и}$ - импульсная рассеиваемая мощность т.е. наибольшее мгновенное значение мощности, рассеиваемое диодом (импульсная рассеиваемая мощность).

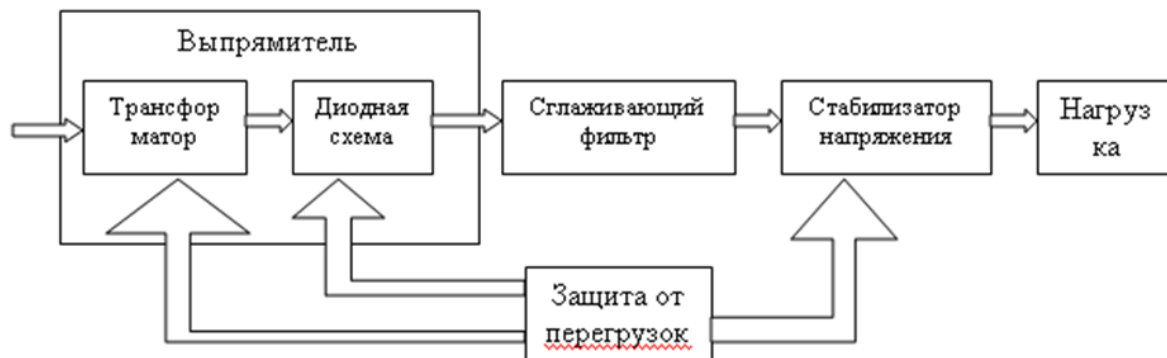
Общие свойства и параметры диодов.

- $U_{пр}$ - постоянное значение прямого напряжения при заданном прямом токе диода,
- $U_{пр и}$ - наибольшее мгновенное значение прямого напряжения, обусловленное импульсным прямым током диода заданного значения,
- $U_{обр}$ - постоянное обратное напряжение,
- $U_{пр ср}$ - среднее прямое напряжение. Среднее за период значение прямого напряжения при заданном прямом токе,
- $U_{пр об}$ - пробивное напряжение. Значение обратного напряжения, вызывающее пробой перехода диода,
- $I_{пр}$ - постоянный прямой ток,
- $I_{пр и}$ - импульсный прямой ток. Наибольшее мгновенное значение прямого тока диода,
- $I_{пр ср}$ - средний прямой ток. Среднее за период значение прямого тока,
- $I_{обр}$ - постоянный обратный ток,
- $I_{обр и}$ - импульсный обратный ток. Наибольшее мгновенное значение обратного тока диода,
- $r_{диф}$ - дифференциальное сопротивление диода,
- $r_{п}$ - последовательное сопротивление потерь,
- $L_{п}$ - индуктивность. Последовательная эквивалентная индуктивность диода,

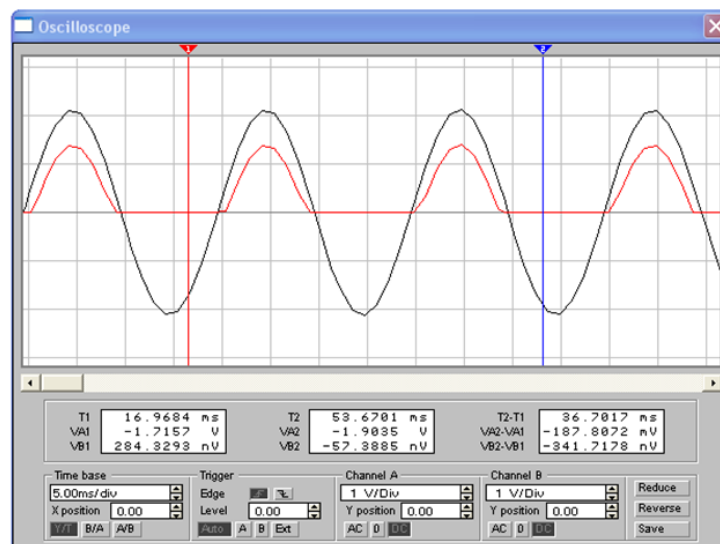
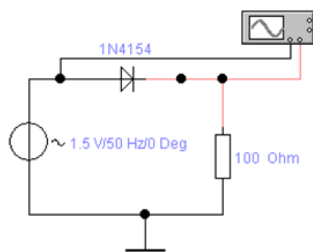
Общие свойства и параметры диодов.

- $T_{эфф}$ – эффективное время жизни неравновесных носителей зарядов. Величина, характеризующая скорость убывания концентраций неравновесных носителей зарядов диода вследствие рекомбинации в объеме и на поверхности полупроводника,
- $Q_{нк}$ – накопленный заряд. Заряд электронов или дырок в базе диода, накопленный при протекании прямого тока,
- $Q_{вос}$ - заряд восстановления. Накопленный заряд диода, вытекающий во внешнюю цепь при переключении диода с заданного прямого тока до заданного обратного напряжения,
- $t_{вос обр}$ - время обратного восстановления. Время переключения диода с заданного прямого тока на заданное обратное напряжение.
- $t_{вос пр}$ - время прямого восстановления. Время в течение которого происходит включение диода и напряжение на нем меняется от нуля до заданного установившегося значения.
- $C_{д}$ - общая емкость. Значение емкости между выводами диода при заданном режиме,
- $C_{пер}$ - емкость перехода. Общая емкость диода без емкости корпуса,
- $C_{кор}$ - емкость корпуса,

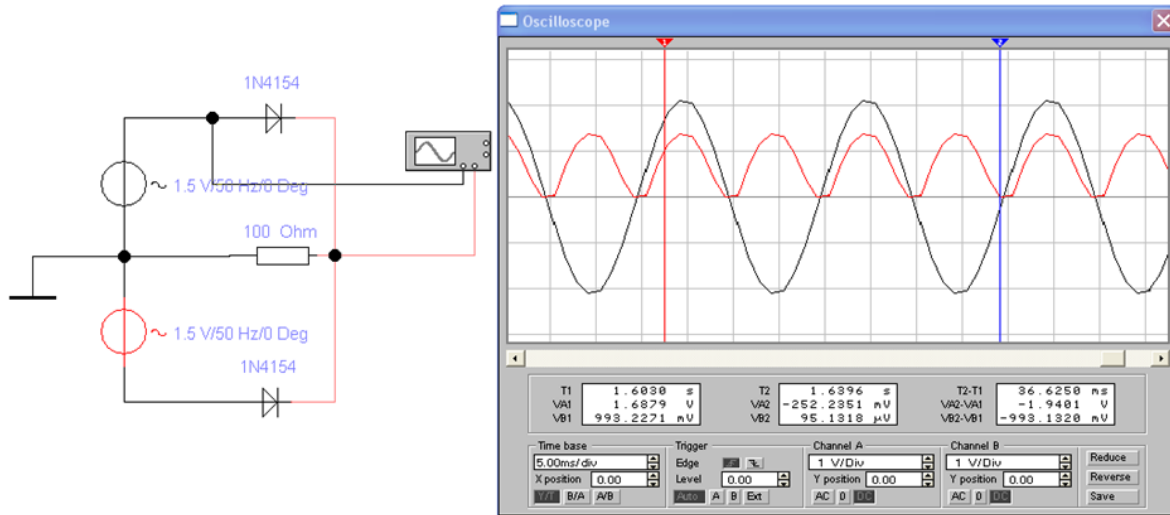
Структурная схема блока питания.



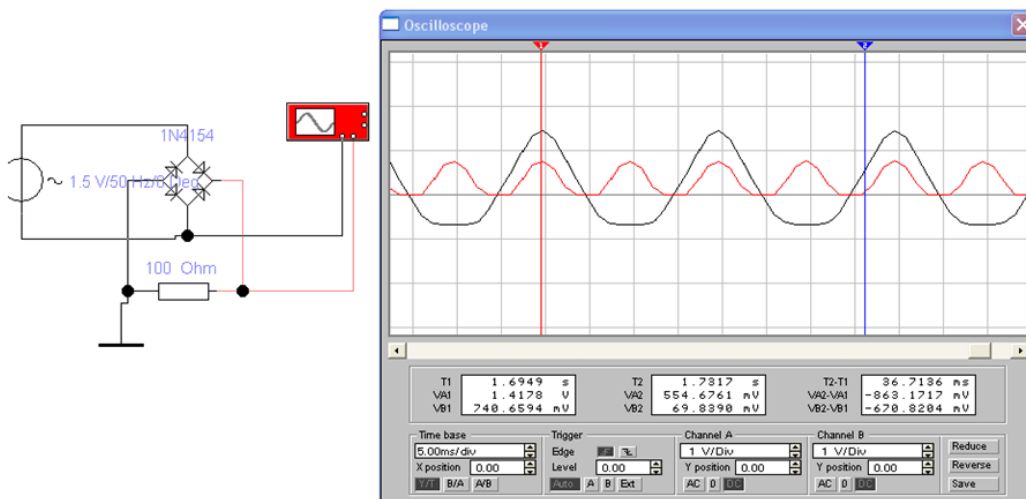
Однополупериодный выпрямитель, работающий на активную нагрузку.



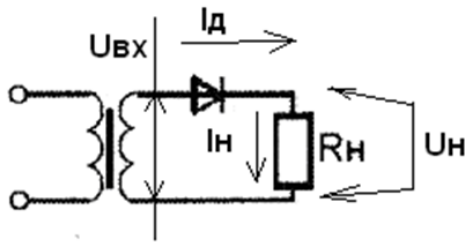
Двухполупериодный выпрямитель, работающий на активную нагрузку.



Двухполупериодный мостиковый выпрямитель, работающий на активную нагрузку.



Однополупериодный выпрямитель.



$$U_{ex} = U_{ex,max} \sin(\omega t)$$

На интервале времени $[0; T/2]$ полупроводниковый диод смещен в прямом направлении и ток и напряжение на нагрузочном резисторе повторяют форму входного сигнала. На интервале $[T/2; T]$ диод смещен в обратном направлении и напряжение и ток в нагрузке равны нулю.

Среднее значение напряжения на R_n равно:

$$U_{н.ср} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} U_n dt = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} U_{ex,max} \sin(\omega t) dt = -\frac{U_{ex,max}}{T\omega} \cos(\omega t) \Big|_0^{T/2} = \frac{U_{ex,max}}{\pi} = \sqrt{2} \frac{U_{ex}}{\pi}$$

Действующее значение тока через R_n равно:

$$I_{н.ср} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} i_{max} \sin(\omega t) dt \approx \frac{I_{max}}{\pi} = 0.318 I_{max}$$

Действующее значение тока через R_n равно:

$$I_{н.д} = \sqrt{\frac{I_{max}^2}{2\pi} \int_0^{\pi} \sin^2(\omega t) dt} = \frac{I_{max}}{2} = 0.5 I_{max}$$

Коэффициент пульсаций однополупериодного выпрямителя.

Спектральный состав выпрямленного напряжения имеет вид:

$$U_n = \frac{1}{\pi} U_{ex,max} + \frac{1}{2} U_{ex,max} \sin(\omega t) - \frac{2}{3\pi} U_{ex,max} \cos(2\omega t) - \frac{2}{15\pi} U_{ex,max} \cos(4\omega t) - \dots$$

Коэффициент пульсаций равен отношению амплитуды первой гармоники к значению среднего выпрямленного напряжения:

$$K_n = \frac{U_{m1}}{U_{ср}} = \frac{\pi}{2} = 1.57$$

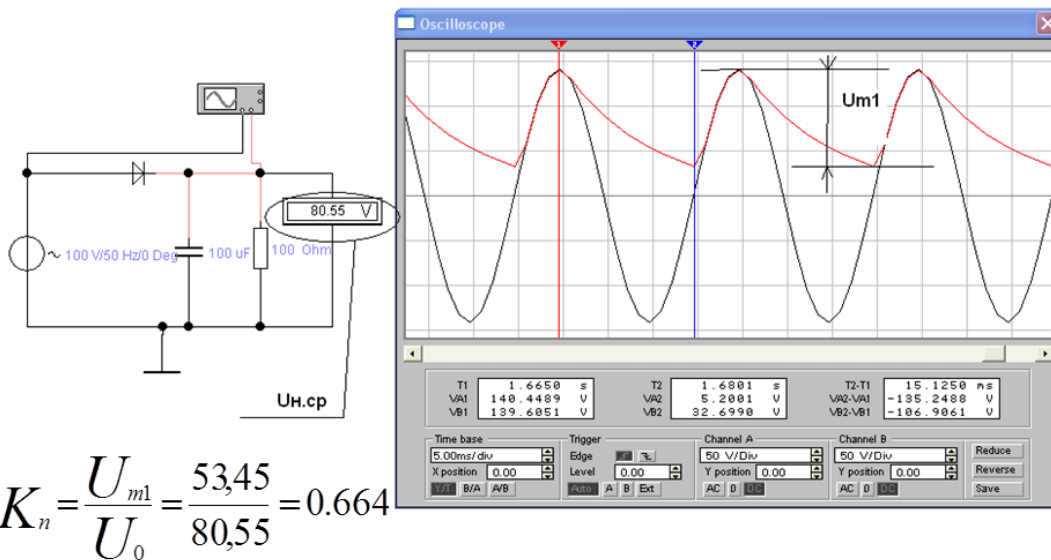
Двухполупериодный выпрямитель.

$$U_{н.ср} = \frac{2U_{ex.max}}{\pi} = 2\sqrt{2} \frac{U_{ex.д}}{\pi} = 0.637 U_{ex.max}$$

$$I_{н.ср} = \frac{2I_{ex.max}}{\pi} = 2\sqrt{2} \frac{I_{ex.д}}{\pi} = 0.637 I_{ex.max}$$

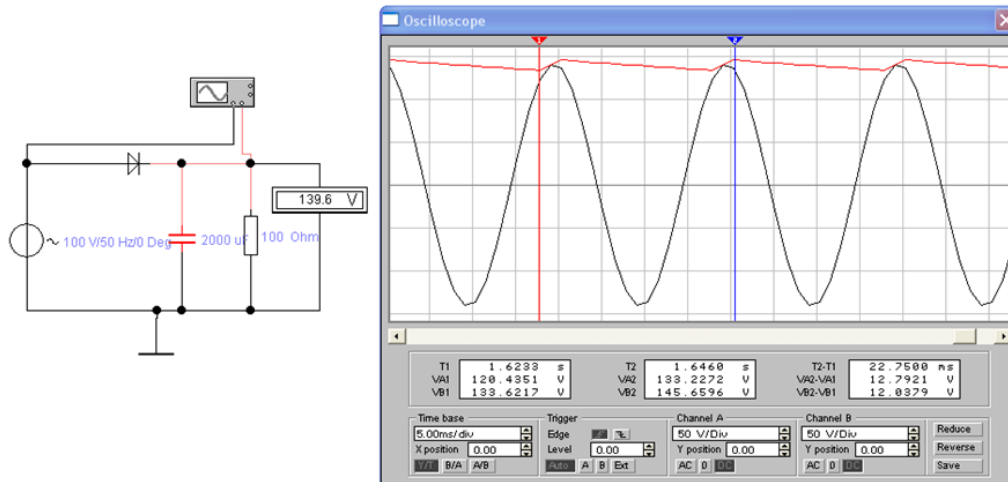
$$K_n = 0.67$$

**Определение коэффициента пульсаций
(однополупериодный выпрямитель).**



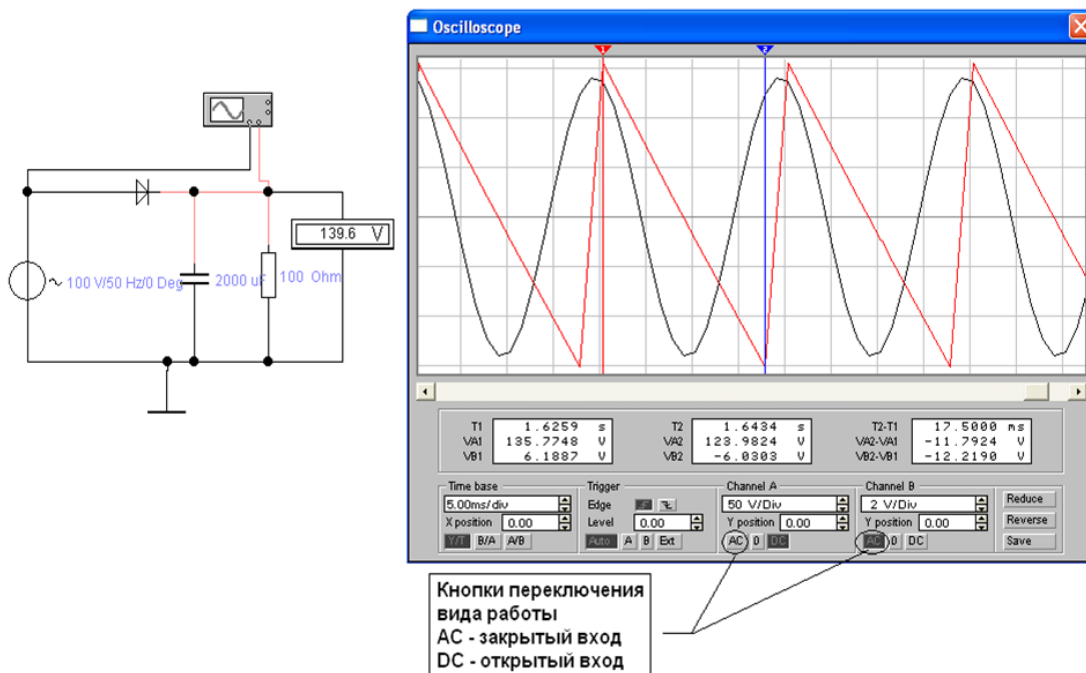
$$K_n = \frac{U_{m1}}{U_0} = \frac{53,45}{80,55} = 0.664$$

Определение коэффициента пульсаций.

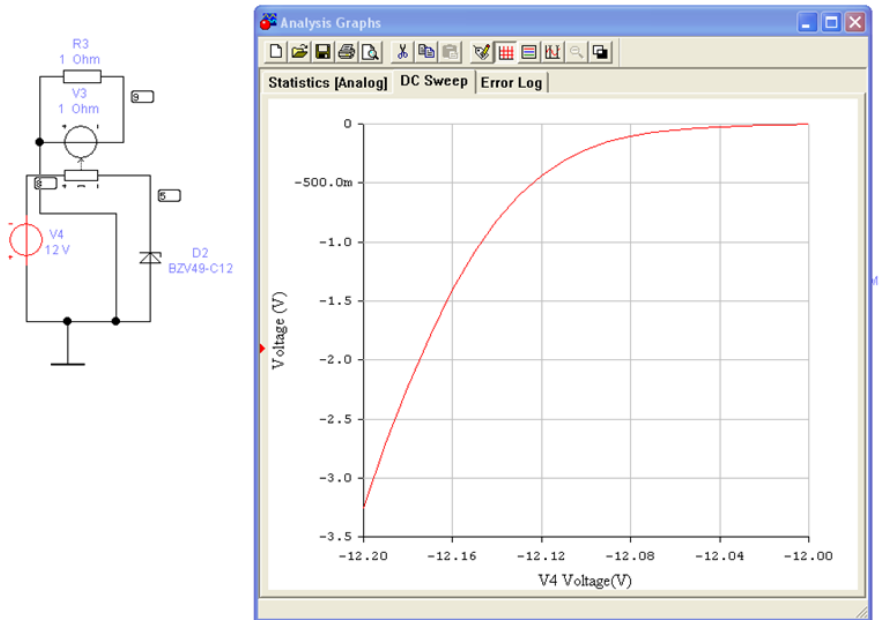


$$K_n = \frac{U_{m1}}{U_0} = \frac{6}{139.6} = 0.043$$

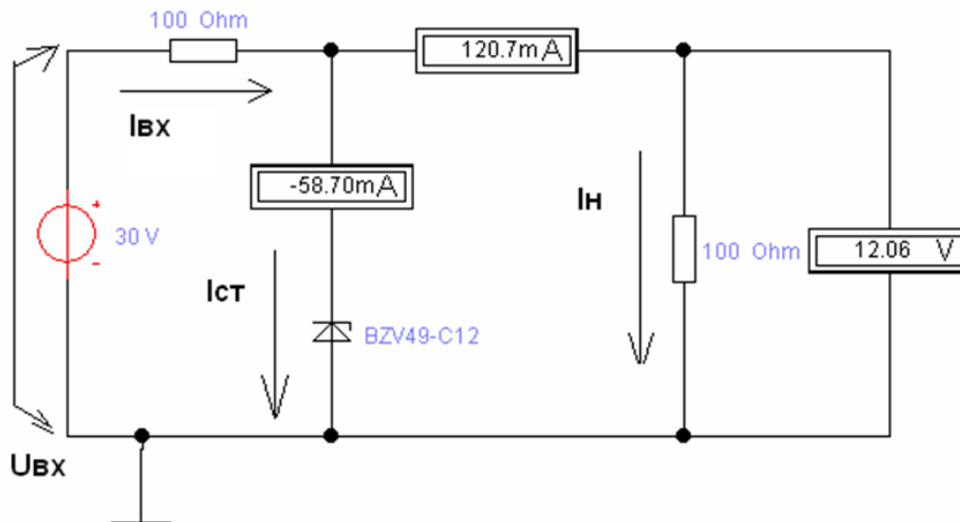
Определение коэффициента пульсаций.



ВАХ стабилитрона.



Параметрический стабилизатор напряжения.



Расчет параметрического стабилизатора напряжения.

$$I_{\delta} = I_H + I_{cm}$$

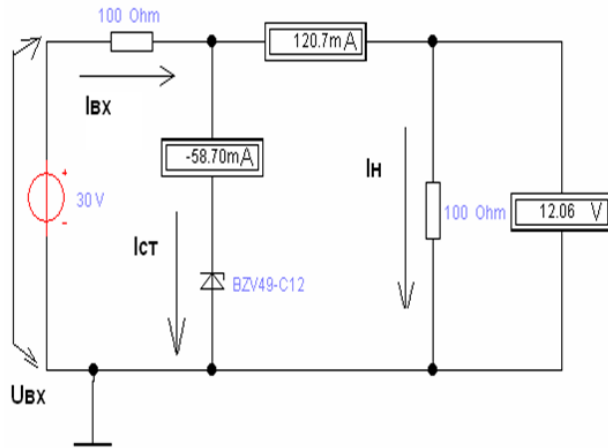
$$U_{p\delta} = \frac{I_H + I_{cm}}{R_{\delta}}$$

$$I_{cm} = \frac{U_{\delta} - U_H}{R_{\delta}} - \frac{U_H}{R_H}$$

$$R_{\delta} = \frac{U_{\delta \cdot \min} - U_H}{I_{cm \cdot \min} + \frac{U_H}{R_{H \cdot \min}}}$$

$$P_{cm \cdot \max} = U_{cm} I_{cm \cdot \max}$$

$$P_{R\delta} = \frac{(U_{d \cdot \max} - U_{cm})^{**2}}{R_{\delta}}$$



Расчет параметрического стабилизатора напряжения.

$$I_{ex} = I_H + I_{cm}$$

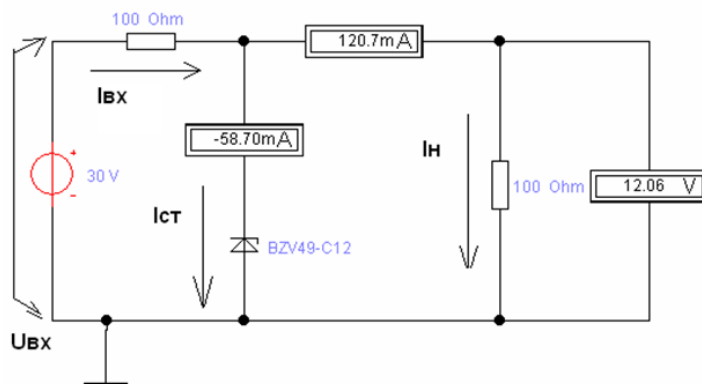
$$U_{R\delta} = (I_H + I_{cm}) * R_{\delta}$$

$$I_{cm} = \frac{U_{ex} - U_H}{R_{\delta}} - \frac{U_H}{R_H}$$

$$R_{\delta} = \frac{U_{ex \cdot \min} - U_H}{I_{cm \cdot \min} + \frac{U_H}{R_{H \cdot \min}}}$$

$$P_{cm \cdot \max} = U_{cm} I_{cm \cdot \max}$$

$$P_{R\delta} = \frac{(U_{ex \cdot \max} - U_{cm})^{**2}}{R_{\delta}}$$



Параметрический стабилизатор напряжения. Кст и Rвых.

$$K_{ст} = \frac{\Delta U_{ex} / \Delta U_{н}}{U_{ex} / U_{н}}$$

Приращение напряжения на выходе стабилизатора $\Delta U_{н}$ связано с приращением входного напряжения ΔU_{ex} соотношением:

$$\Delta U_{н} = \frac{\Delta U_{ex} (r_{\delta} \parallel R_{н})}{R_{\sigma} + (r_{\delta} \parallel R_{н})}$$

Учтем, что $R_{н} \gg r_{\delta}$ и $R_{\sigma} \gg r_{\delta}$, тогда:

$$\Delta U_{н} = \frac{\Delta U_{ex} r_{\delta}}{R_{\sigma}}$$

$$K_{ст} = \frac{U_{н} \times R_{\sigma}}{U_{ex} r_{\delta}}$$

Рассчитать параметрический стабилизатор напряжения.

Дано:

1. $U_{вх\ max} = 25\text{В}$.
2. $U_{вх\ min} = 20\text{В}$.
3. $I_{н\ max} = 50\text{mA}$.
4. $I_{н\ min} = 5\text{mA}$.
5. $U_{н} = 12\text{В}$.

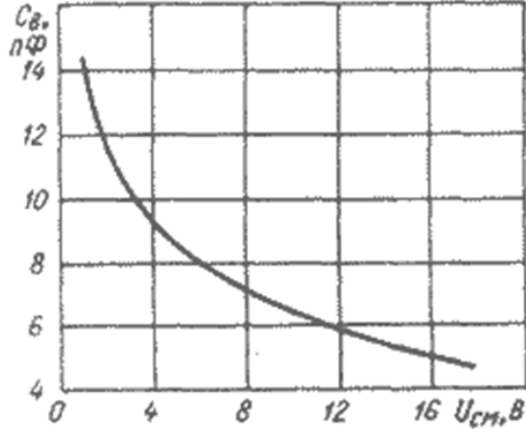
Найти:

R_{σ} , $P_{R_{\sigma}}$, $K_{ст}$, $R_{вых}$, $P_{ст}$ и тип стабилитрона.

Варикапы.

Варикап - это обратносмещенный полупроводниковый диод, в котором используется зависимость барьерной емкости р-п-перехода от приложенного к нему напряжения. Прямая ветвь его вольтамперной характеристики для варикапа несущественна.

Принцип работы варикапа основан на свойстве барьерной C_b емкости р-п-перехода изменять свое значение от приложенного напряжения. Зависимость емкости перехода варикапа от приложенного к нему напряжения называется вольтфарадной характеристикой варикапа. На графике справа приведена вольтфарадная характеристика варикапа Д902.

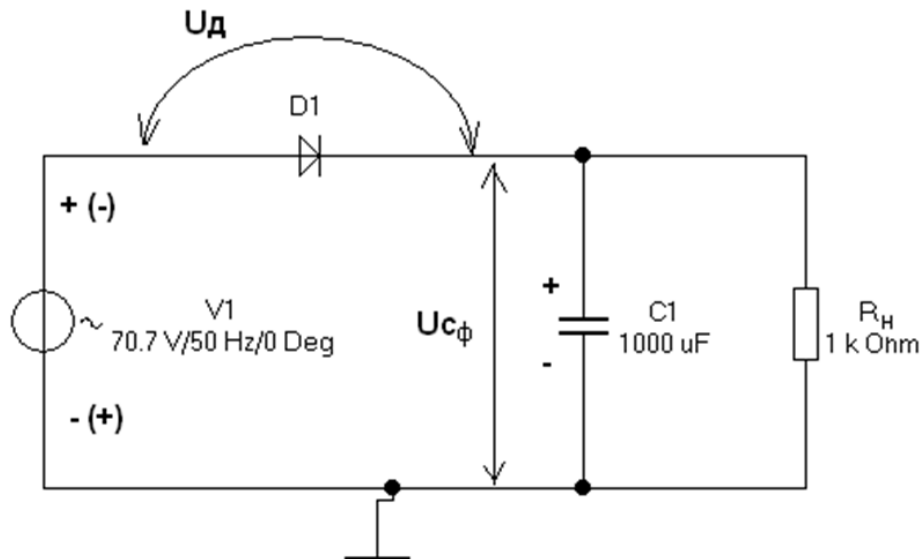


Специальные параметры варикапа.

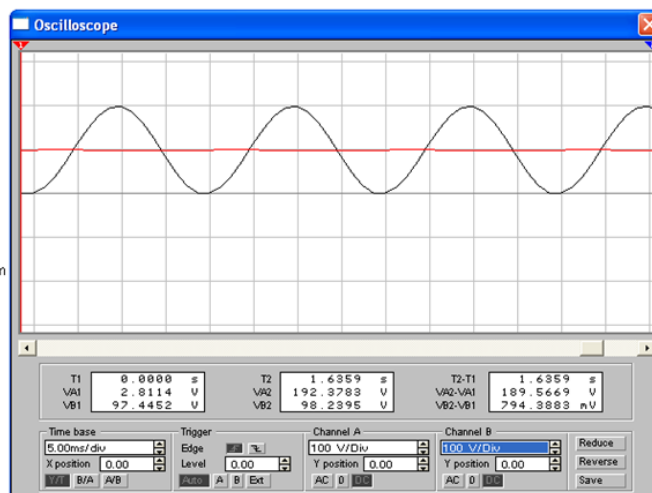
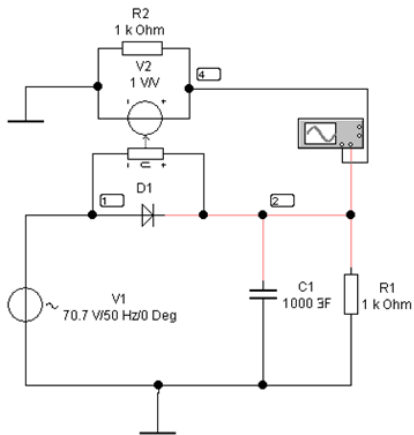
Термин	Обозначение	Определение
Добротность	Q	Отношение реактивного сопротивления варикапа на заданной частоте к сопротивлению потерь при заданном значении емкости или обратного напряжения.
ТКЕ	α_c	Отношение относительного изменения емкости варикапа к вызвавшему его изменению температуры окружающей среды.
ТКД	α_Q	Отношение относительного изменения добротности варикапа к вызвавшему его абсолютному изменению температуры окружающей среды.
Предельная частота	$f_{пред}$	Значение частоты на которой реактивная составляющая проводимости варикапа становится равной активной составляющей его проводимости при заданных условиях.
Коэффициент перекрытия	K_c	Отношение двух емкостей варикапа при двух заданных значениях обратного напряжения.
Минимальная емкость варикапа	C_{min}	Минимальное значение емкости варикапа при максимальном обратном напряжении.
Максимальная емкость варикапа	C_{max}	Максимальное значение емкости варикапа при заданном максимальном значении напряжения.

Однополупериодный выпрямитель с С_Ф.

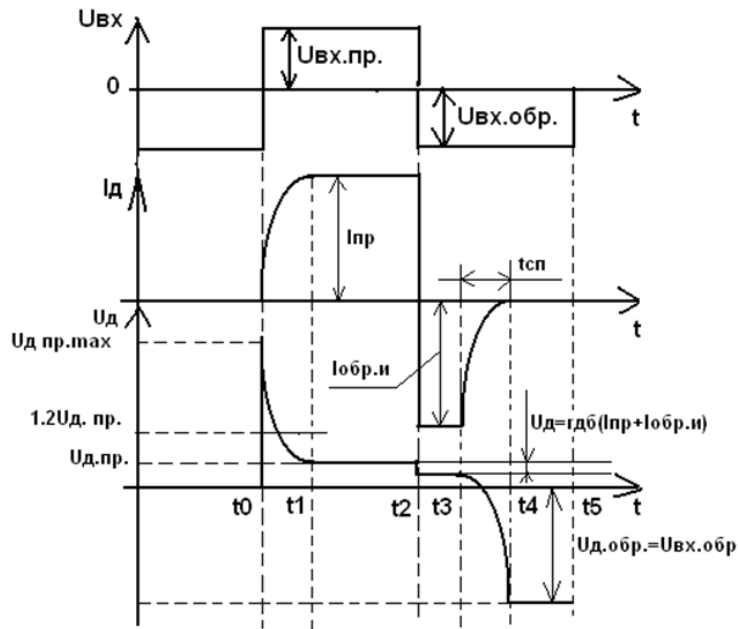
Определение обратного пробивного напряжения диода.



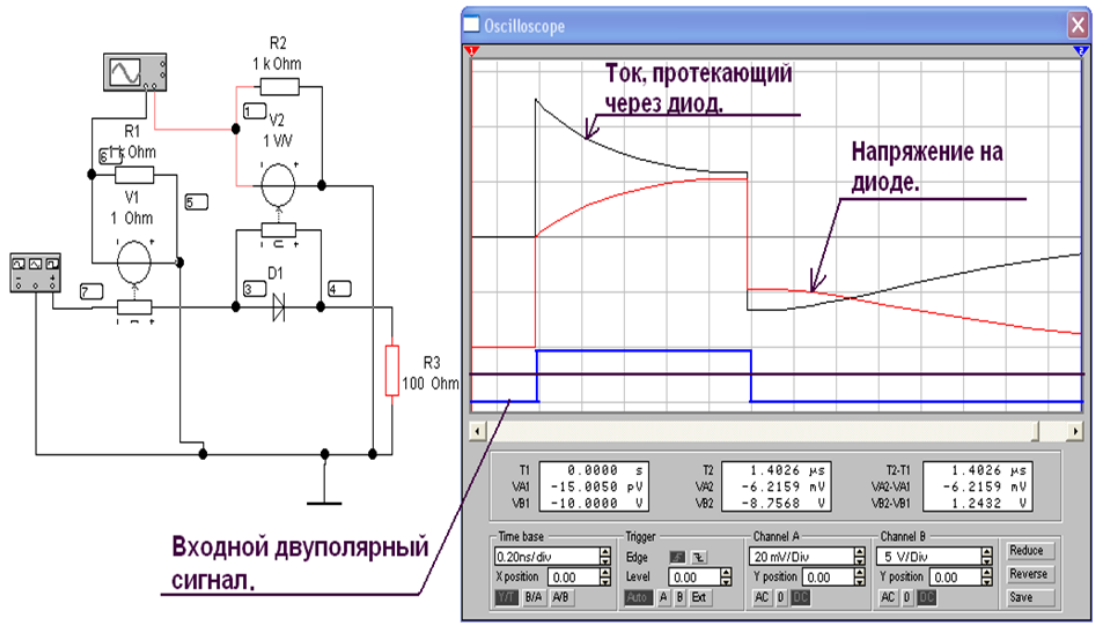
К определению обратного пробивного напряжения выпрямительного диода в однополупериодном выпрямителе.



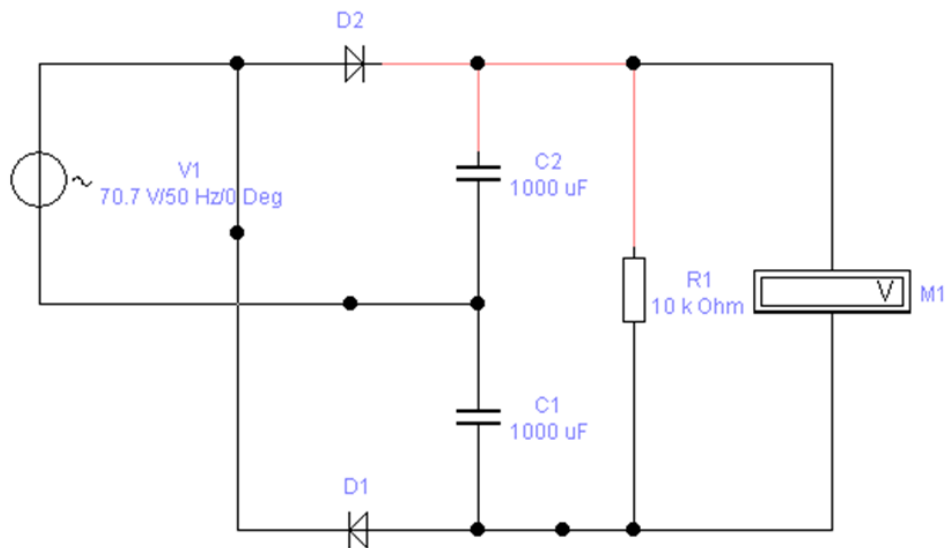
Частотные свойства диодов.



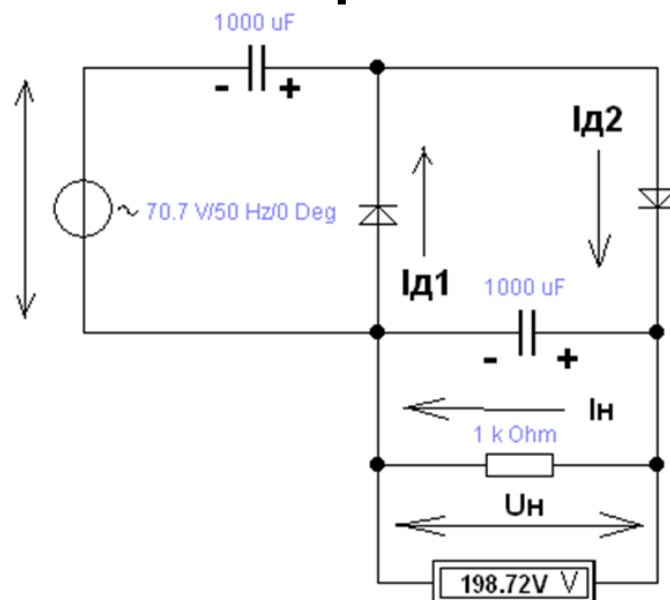
Частотные свойства диодов.



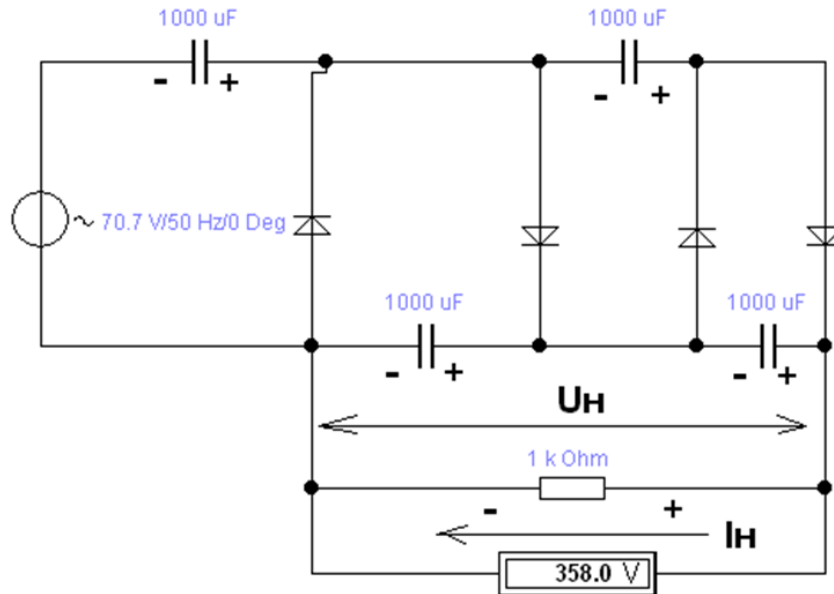
Симметричный удвоитель напряжения.



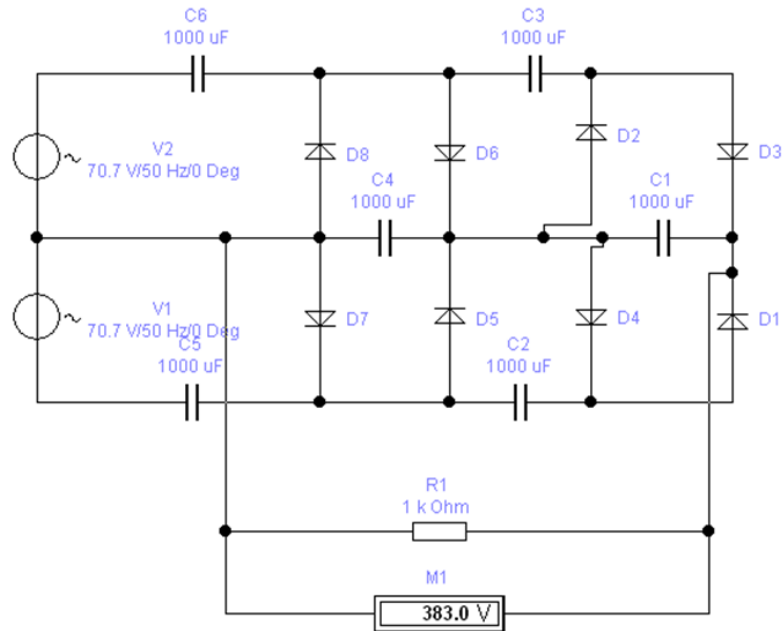
Несимметричный удвоитель напряжения.



Несимметричный п-звенный умножитель напряжения.



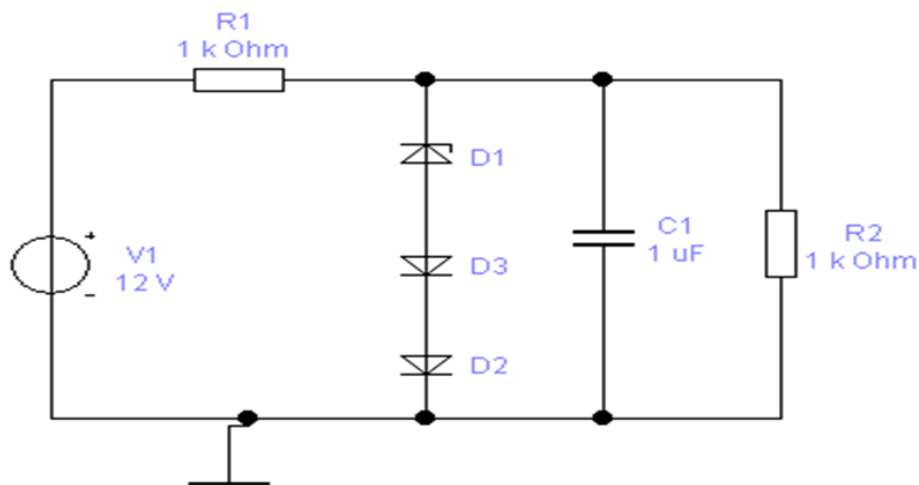
Симметричный п-звенный умножитель напряжения.



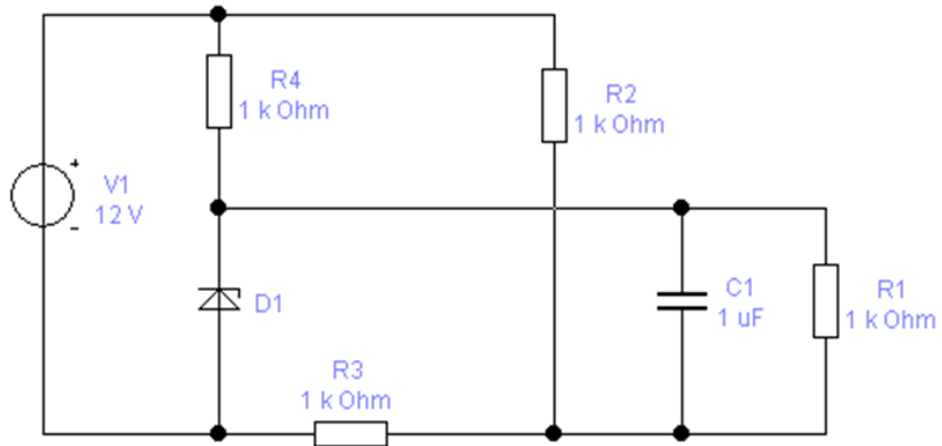
Улучшение характеристик параметрического стабилизатора напряжения.

1. Многокаскадные параметрические стабилизаторы напряжения.
2. Мостовой параметрический стабилизатор напряжения.
3. Стабилизатор с температурной компенсацией.
4. Двухкаскадный параметрический стабилизатор напряжения с дополнительным балластным резистором.
5. Параметрический стабилизатор с источником тока.

Параметрический стабилизатор напряжения с температурная компенсацией.

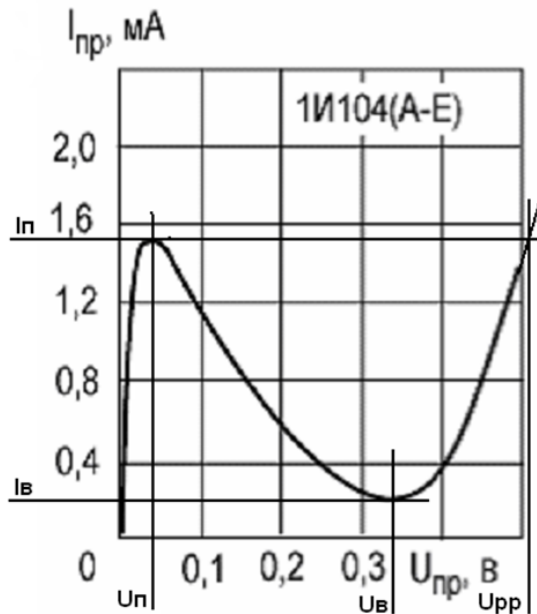


Мостовой параметрический стабилизатор напряжения.



Туннельные диоды.

Туннельным диодом называют полупроводниковый диод на основе р⁺-п⁺ перехода с сильнолегированными областями, на прямом участке вольт-амперной характеристики которого наблюдается участок с отрицательным сопротивлением. Справа на слайде приведена вольт-амперная характеристика типичного туннельного диода при прямом смещении.



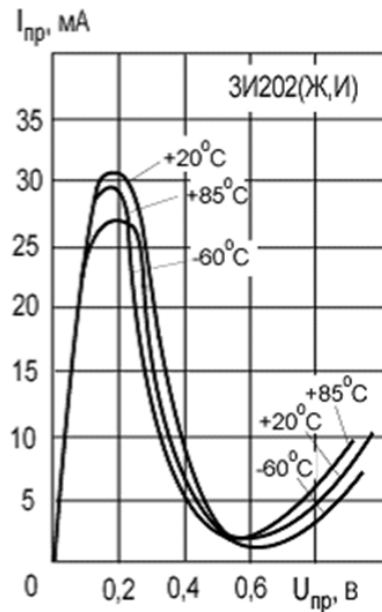
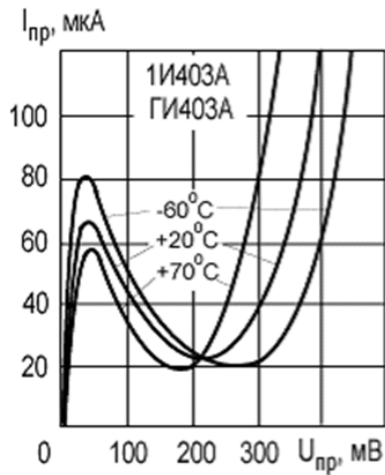
Туннельные диоды.

Т.к. на ВАХ туннельного диода имеется участок с отрицательным сопротивлением, то туннельный диод можно использовать в схемах генераторов, усилителей и в переключательных схемах. Качественные показатели устройств на туннельных диодах зависят от линейного участка с отрицательным сопротивлением. В зависимости от характеристик туннельные диоды делятся на:

1. Усилительные.
2. Генераторные.
3. Переключательные.

Для изготовления туннельных диодов используются вырожденные полупроводники следовательно их проводимость приближается к металлам. Рабочая температура приближается к 400°С.

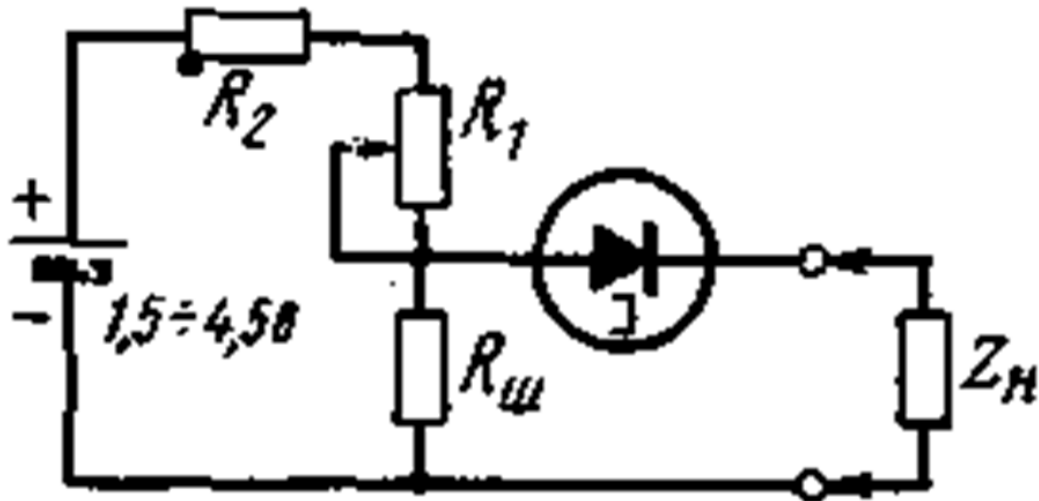
Температурная зависимость ВАХ туннельного диода.



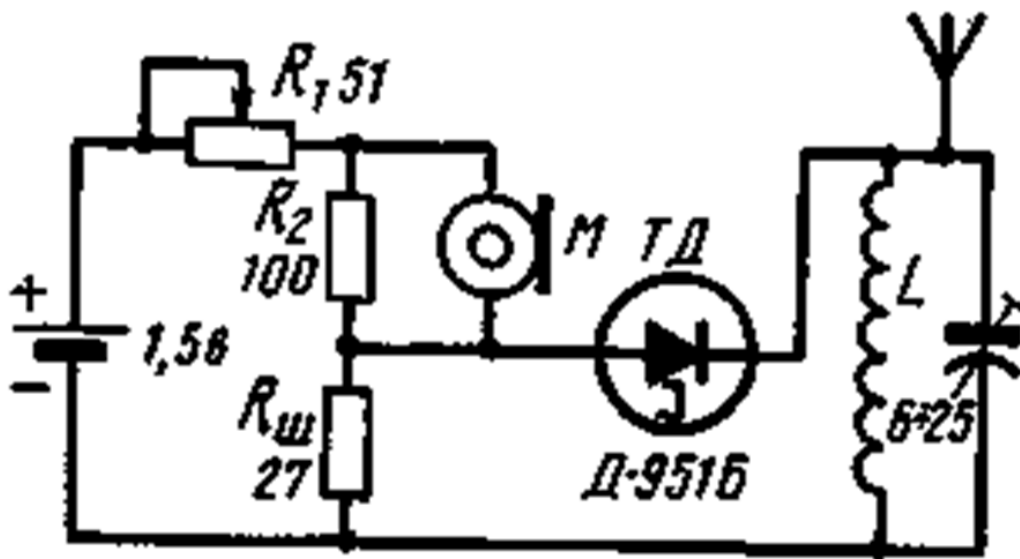
Специальные параметры туннельных и обращенных диодов.

Термин	Обозначение	Определение
Пиковый ток	I_n	Значение прямого тока в точке максимума ВАХ, при котором дифференциальная активная проводимость равна нулю.
Ток впадины	I_e	Значение прямого тока в точке минимума ВАХ при котором дифференциальная активная проводимость равна нулю.
Отношение токов	I_n / I_e	Отношение пикового тока к току впадины.
Напряжение пика	U_n	Значение прямого напряжения, соответствующее пиковому току.
Напряжение впадины	U_e	Значение прямого напряжения, соответствующее току впадины.
Напряжение раствора	U_{pp}	Значение прямого напряжения на второй восходящей ветви ВАХ, при котором ток равен пиковому току.
Отрицательная проводимость	$g_{пер}$	Проводимость, определяемая на середине участка с отрицательным сопротивлением.
Предельная резистивная частота	f_c	Значение частоты, на которой активная составляющая полного сопротивления туннельного диода обращается в ноль.

Схема смещения туннельного диода по постоянному току.



Передатчик на туннельном диоде.



Светодиоды.

Полупроводниковый светоизлучающий диод (светодиод) – излучающий полупроводниковый прибор с одним или несколькими электрическими переходами. Светодиод непосредственно преобразует электрическую энергию в энергию некогерентного светового излучения.

В зависимости от длины волны излучения светоизлучающие диоды делятся на диоды с излучением:

1. в видимой части спектра,
2. в инфракрасной части спектра (ИК-диоды).

В зависимости от назначения светоизлучающие диоды на:

1. излучательные,
2. индикаторные.

По способу излучения основного светового потока светоизлучающие диоды делятся на:

1. Инжекционные светоизлучающие диоды с непосредственным излучением,
2. Диоды с антистоксовыми люминофорами.

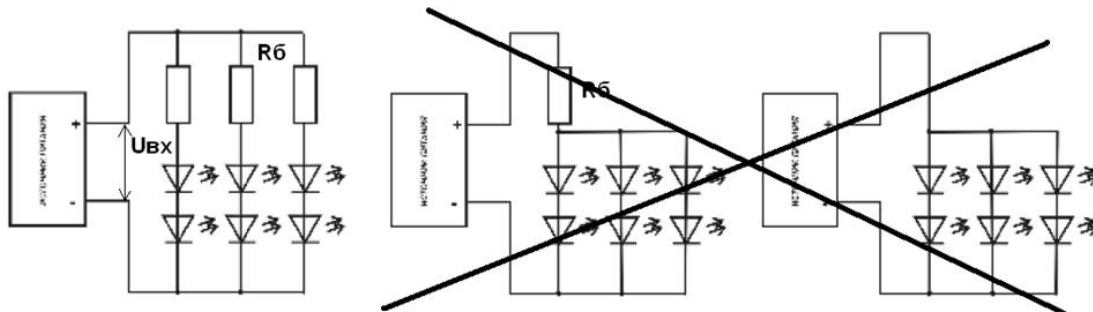
Светодиоды.



Параметры светоизлучающих диодов.

Термин	Обозначение	Определение
Яркость	L	Величина, равная отношению силы света светодиода к площади светящейся поверхности. Измеряется в канделах на метр квадратный $[cd/m^2]$
Сила света	I	Отношение светового потока, распространяющегося от светодиода в рассматриваемом направлении внутри малого телесного угла, к величине этого телесного угла. Измеряется в канделах [кд].
Мощность излучения	$P_{изл}$	Полный поток излучения определенного спектрального состава.
Максимум спектрального распределения	λ_{max}	Длина волны светового излучения, соответствующая максимуму спектральной характеристики светодиода.
Время нарастания излучения	$t_{нар.изл}$	Интервал времени, в течение которого мощность излучения диода после включения изменяется от 0.1 до 0.9 максимального значения.
Время спада излучения	$t_{сп.изл}$	Интервал времени, в течение которого мощность излучения диода после выключения меняется от 0.9 до 0.1 максимального значения.
Угол раскрытия диаграммы направленности излучения	θ	Угол раскрытия диаграммы направленности излучения диода, измеренный на уровне 0.5.
Световая отдача	η	Отношение светового потока, испускаемого диодом, к потребляемой им мощности.
Квантовый выход	η_q	Отношение числа излучаемых фотонов к числу электронов, проходящих через p-n переход.

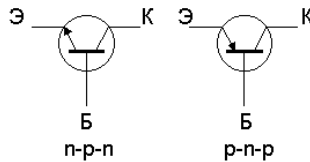
Схема включения светодиодов.



$$R_6 = \frac{U_{вх} - U_{\phi}}{I_{\phi}}$$

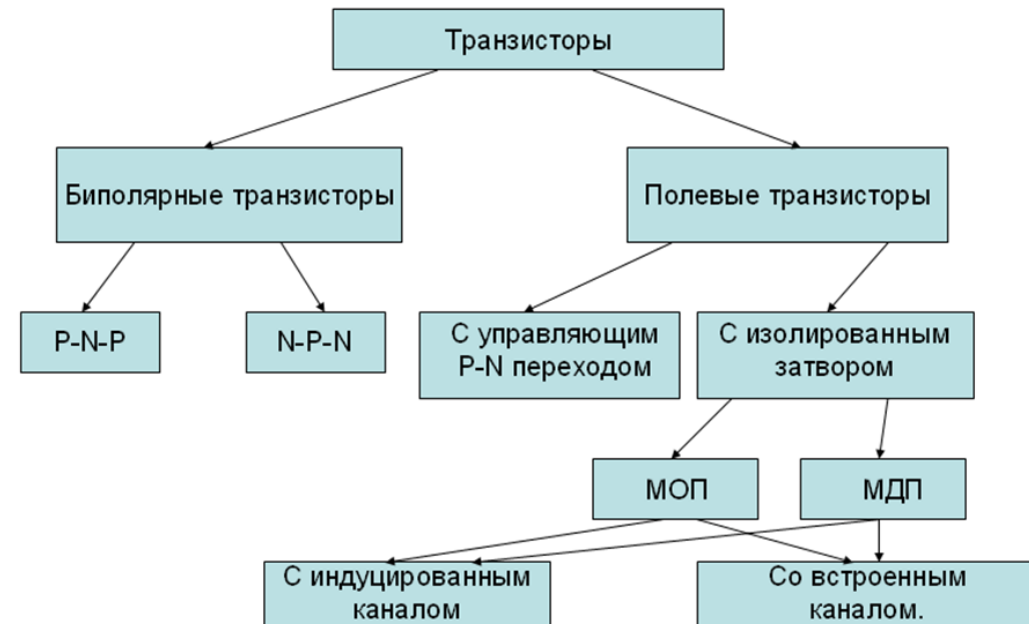
Биполярный транзистор.

Биполярным транзистором называется трехэлектродный полупроводниковый прибор с двумя или более взаимодействующими электронно-дырочными переходами, усилительные свойства которого обусловлены явлениями инжекции и экстракции неосновных носителей заряда. В биполярном транзисторе чередуются по типу электрической проводимости три области полупроводника. В зависимости от порядка чередования этих областей различают транзисторы р-п-р и п-р-п типа.

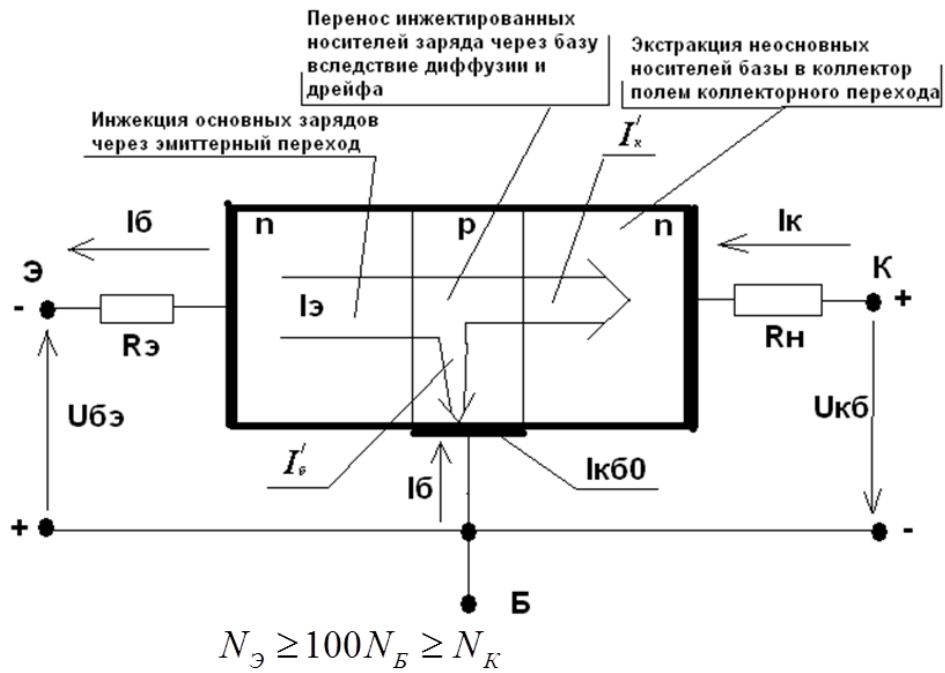


Классификация транзисторов.

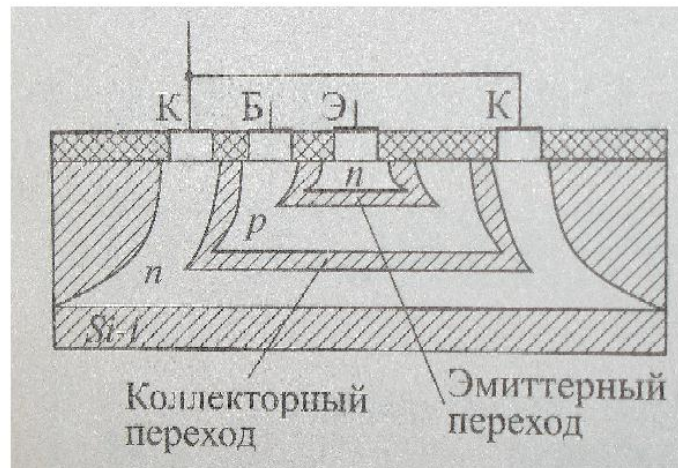
- Текст слайда



Распределение токов в транзисторе n-p-n-типа .



Биполярные транзисторы.



Планарная N-P-N структура.

Биполярный транзистор.

В биполярном транзисторе используются одновременно два типа носителей заряда – электроны и дырки (поэтому такой транзистор называется биполярным).

Работа биполярного транзистора основана на взаимодействии двух р-п-переходов. Чтобы транзистор мог работать как усилительный прибор необходимо чтобы толщина среднего слоя b (область базы) была меньше длины свободного пробега L (диффузионная длина) носителей заряда в этой области ($b \ll L$).

Рассмотрим работу п-р-п-транзистора.

Левая часть транзисторной структуры п- область (эмиттер) будет инжектировать электроны в соседнюю р-область. Правая п-область, которая экстрагирует из соседней р-области электроны называется коллектором.

$$I_{\text{Б}} = I_{\text{Б}}' - I_{\text{КБ}0}$$

$$I_{\text{К}} = \alpha I_{\text{Э}} + I_{\text{КБ}0}$$

$$I_{\text{Э}} \gg I_{\text{КБ}0}$$

$$I_{\text{К}} \approx \alpha I_{\text{Э}}$$

$$I_{\text{Б}} = I_{\text{Э}} - I_{\text{К}}$$

$$I_{\text{Б}} = \frac{I_{\text{К}}}{\alpha} - I_{\text{К}}$$

$$I_{\text{Б}} = \frac{1 - \alpha}{\alpha} I_{\text{К}}$$

$$\frac{I_{\text{К}}}{I_{\text{Б}}} = \frac{\alpha}{(1 - \alpha)} = \beta$$

$$I_{\text{К}} = \beta I_{\text{Б}}$$

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

Биполярный транзистор.

Приложим к эмиттерному переходу прямое напряжение ($U_{\text{КБ}}$), а к коллекторному – обратное ($U_{\text{КБ}}$). В результате через эмиттерный переход в область базы начнут инжектироваться электроны. Часть инжектированных электронов рекомбинирует с основными для этой области носителями заряда вследствие чего образуется ток базы. Оставшаяся часть электронов достигнет коллекторного перехода с помощью $U_{\text{КБ}}$ подвергается экстракции в правую п-область и образует коллекторный ток. Уменьшение потока электронов учитывается следующей формулой:

Где α - коэффициент передачи тока эмиттера. Для современных транзисторов $\alpha = 0.95 - 0.99$.

Через запертый коллекторный переход потечет ток $I_{\text{КБ}0}$, который образуется потоком из п- в р-область неосновных носителей заряда для коллекторной области. Этот ток совместно с током образует выходной (коллекторный) ток транзистора. равен:

$$I_{\text{Б}} = I_{\text{Б}}' - I_{\text{КБ}0}$$

$$I_{\text{К}} = \alpha I_{\text{Э}} + I_{\text{КБ}0}$$

$$I_{\text{Э}} \gg I_{\text{КБ}0}$$

$$I_{\text{К}} \approx \alpha I_{\text{Э}}$$

$$I_{\text{Б}} = I_{\text{Э}} - I_{\text{К}}$$

$$I_{\text{Б}} = \frac{I_{\text{К}}}{\alpha} - I_{\text{К}}$$

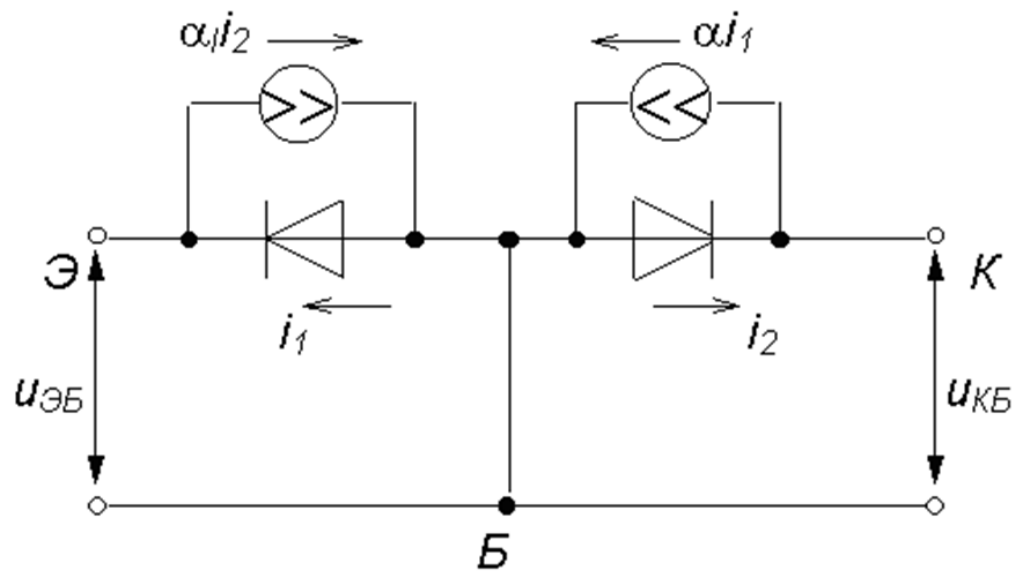
$$I_{\text{Б}} = \frac{1 - \alpha}{\alpha} I_{\text{К}}$$

$$\frac{I_{\text{К}}}{I_{\text{Б}}} = \frac{\alpha}{(1 - \alpha)} = \beta$$

$$I_{\text{К}} = \beta I_{\text{Б}}$$

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

Модель Эберса-Молла.



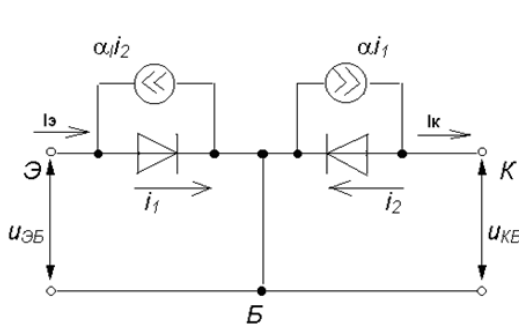
Модель Эберса-Молла.

$$\begin{cases} i_1 = I_{ЭБК} \left(\exp \frac{u_{ЭБ}}{u_T} - 1 \right) \\ i_2 = I_{КБК} \left(\exp \frac{u_{КБ}}{u_T} - 1 \right) \end{cases}$$

Режимы работы биполярного транзистора.

Режим	п-р-п транзистор	р-п-р транзистор
Нормальный активный режим	$U_{БЭ} > 0;$ $U_{КБ} > 0;$	$U_{БЭ} < 0;$ $U_{КБ} < 0;$
Режим насыщения	$U_{БЭ} > 0;$ $U_{КБ} < 0;$	$U_{БЭ} < 0;$ $U_{КБ} > 0;$
Режим отсечки	$U_{БЭ} < 0;$ $U_{КБ} > 0;$	$U_{БЭ} > 0;$ $U_{КБ} < 0;$
Инверсный активный режим.	$U_{БЭ} < 0;$ $U_{КБ} < 0;$	$U_{БЭ} > 0;$ $U_{КБ} > 0;$

Модель биполярного транзистора. Модель Эберса-Молла.



$$I_{\text{Э}} = I_1 - \alpha I_2$$

$$I_{\text{К}} = \alpha I_1 - I_2$$

$$I_1 = I_{\text{ЭБЭ}} \left(e^{\frac{qU_{\text{ЭБ}}}{kT}} - 1 \right)$$

$$I_2 = I_{\text{КБК}} \left(e^{\frac{qU_{\text{КБ}}}{kT}} - 1 \right)$$

Где $I_{\text{ЭБЭ}}$ и $I_{\text{КБК}}$ - обратные токи эмиттерного и коллекторного переходов.

Связь между токами и напряжениями в биполярном транзисторе может быть описана математической моделью Эберса-Молла. В основе этой модели лежит замещение р-п-переходов транзистора двумя диодами включенными встречно. Параллельно с каждым диодом включены источники тока характеризующие инжекцию носителей заряда.

h – параметры транзистора.



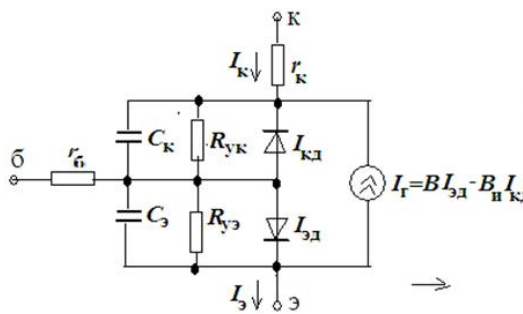
Модель Эберса-Молла.

$$I_{\text{Э}} = I_{\text{ЭБК}} \left(e^{\frac{qU_{\text{ЭБ}}}{kT}} - 1 \right) - \alpha_i I_{\text{КБК}} \left(e^{\frac{qU_{\text{КБ}}}{kT}} - 1 \right)$$

$$I_{\text{К}} = \frac{\alpha I_{\text{ЭБ0}}}{1 - \alpha \alpha_i} \left(e^{\frac{qU_{\text{ЭБ}}}{kT}} - 1 \right) - \frac{I_{\text{КБ0}}}{1 - \alpha \alpha_i} \left(e^{\frac{qU_{\text{КБ}}}{kT}} - 1 \right)$$

$$I_{\text{Б}} = \frac{(1 - \alpha) I_{\text{ЭБ0}}}{1 - \alpha \alpha} \left(e^{\frac{qU_{\text{ЭБ}}}{kT}} - 1 \right) + \frac{(1 - \alpha_i) I_{\text{КБ0}}}{1 - \alpha \alpha_i} \left(e^{\frac{qU_{\text{КБ}}}{kT}} - 1 \right)$$

Модель ПАЭС.



$$\frac{dU_э}{dt} = \frac{I_э - I_{эз}}{C_э}, \quad \frac{dU_к}{dt} = \frac{I_к - I_{ак}}{C_к},$$

где $I_{эз} = (B+1)I_{эд} - B И I_{кд} + U_э / R_{уэ}$,

$$I_{ак} = (B И + 1)I_{кд} - B I_{эд} + U_к / R_{ук},$$

$$I_{эд} = i_{тэ} \left(\exp \frac{U_э}{m_э \Phi_T} - 1 \right),$$

$$I_{кд} = i_{тк} \left(\exp \frac{U_э}{m_к \Phi_T} - 1 \right),$$

$$C_э = C_{бэ} + \tau (I_{эд} + i_{тэ}) m_э \Phi_T,$$

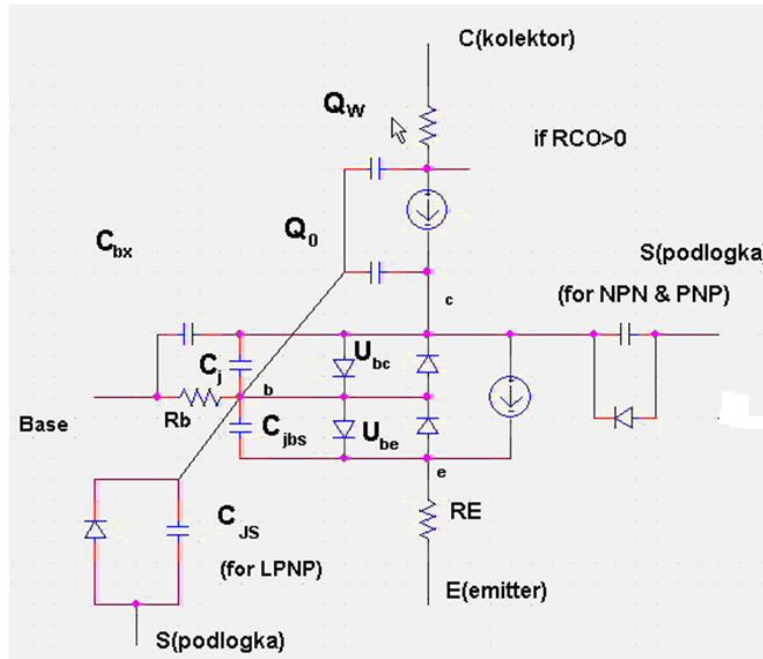
$$C_к = C_{бк} + \tau_н (I_{кд} + i_{тк}) m_к \Phi_T.$$

Модель Гуммеля-Пуна.

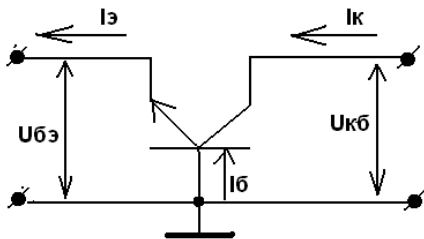
Модель Гуммеля-Пуна - это модель биполярного транзистора, в которой по сравнению с моделью Эберса-Молла учитывается ряд дополнительных эффектов, что повышает точность моделирования. Однако для использования модели Гуммеля-Пуна требуется большой объем исходных данных - в модели число параметров увеличено до 25. Если пользователь не располагает такими данными, то в программах анализа, используемых на схемотехническом уровне, предусмотрен переход к использованию модели Эберса-Молла.

В модели Гуммеля -Пуна учитываются влияние уровня инжекции на коэффициент усиления, эффект Кирка - расширение базы в область коллектора, эффект Эрли - модуляция ширины базы.

Модель Гуммеля-Пуна.



Три схемы включения транзистора. Схема с общей базой (ОБ).



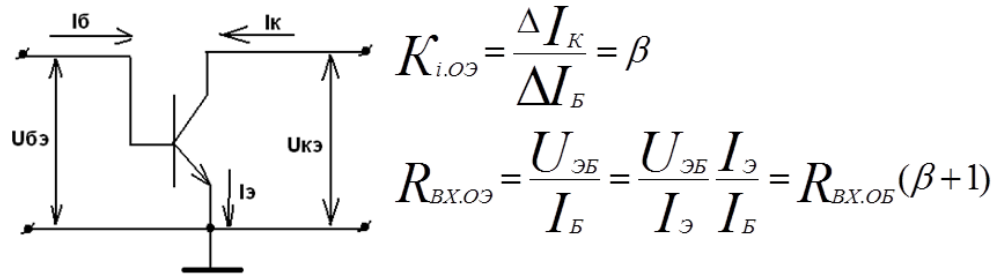
$$K_{iOO} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_э}$$

$$R_{ex.OB} = \frac{U_{эБ}}{I_э}$$

$$K_{U.OB} = \frac{\Delta U_{ВЫХ}}{\Delta U_{эБ}} = \frac{\Delta I_K R_H}{\Delta I_э R_{ВХБ}} = \alpha \frac{R_H}{R_{ВХБ}}$$

Схема с ОБ характеризуется малым входным сопротивлением, коэффициентом усиления по току меньшим единицы и коэффициентом усиления по напряжению больше единицы.

Три схемы включения транзистора. Схема с общим эмиттером (ОЭ).



Здесь β – статический коэффициент передачи тока базы. С достаточной степенью точности можно положить $\beta = \beta$, тогда $R_{вх.ОЭ} \approx R_{вх.ОБ} (\beta + 1) \approx R_{вх.ОБ} \beta$

$$K_{U.ОЭ} = \frac{\Delta U_H}{\Delta U_{эБ}} = \frac{\Delta I_K R_H}{\Delta I_B R_{вх.ОЭ}} = \beta \frac{R_H}{\beta R_{вх.ОБ}} = \frac{R_H}{R_{вх.ОБ}}$$

Три схемы включения транзистора. Схема с общим коллектором (ОК).

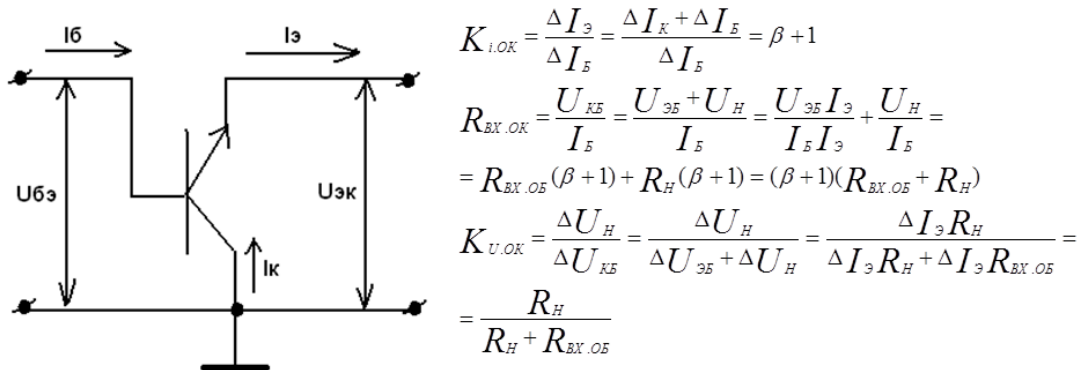
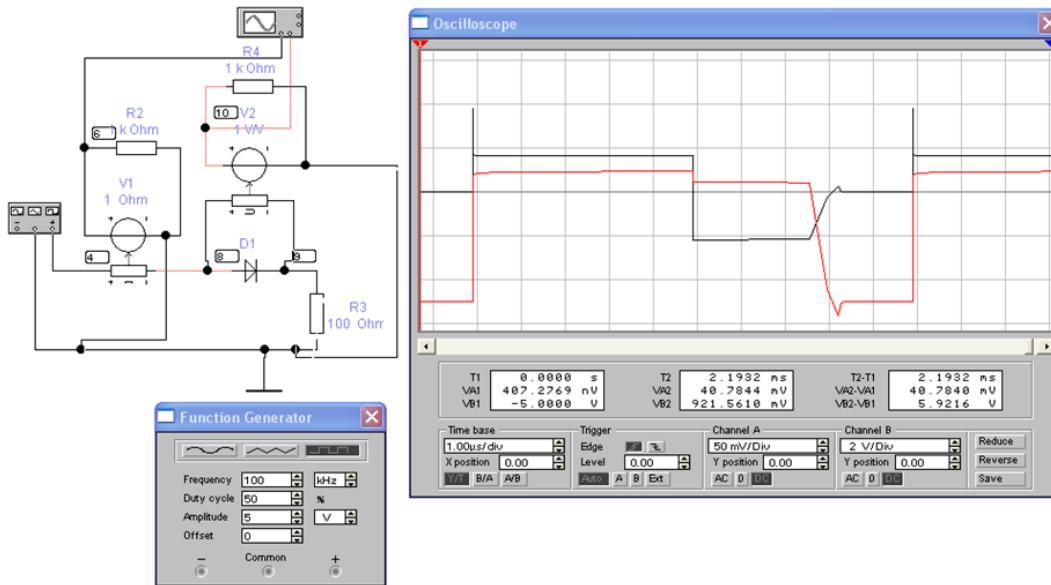


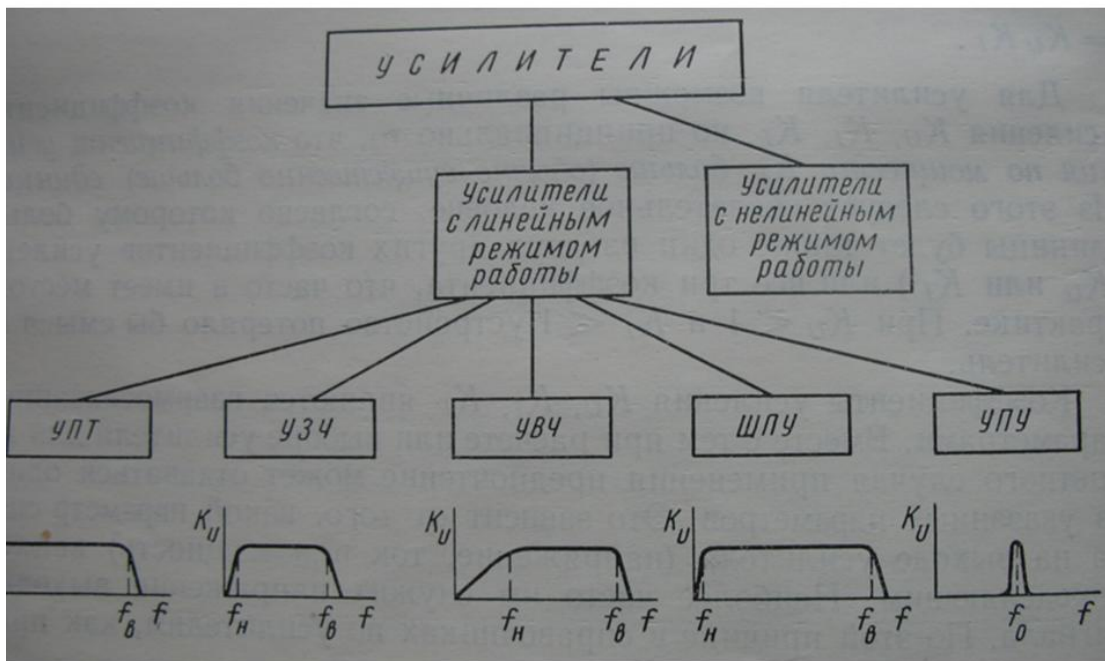
Схема с ОК обладает самым большим коэффициентом усиления по току. $K_i = (\beta + 1)$. Коэффициент усиления по напряжению $K_u < 1$.

Лекция № 10.

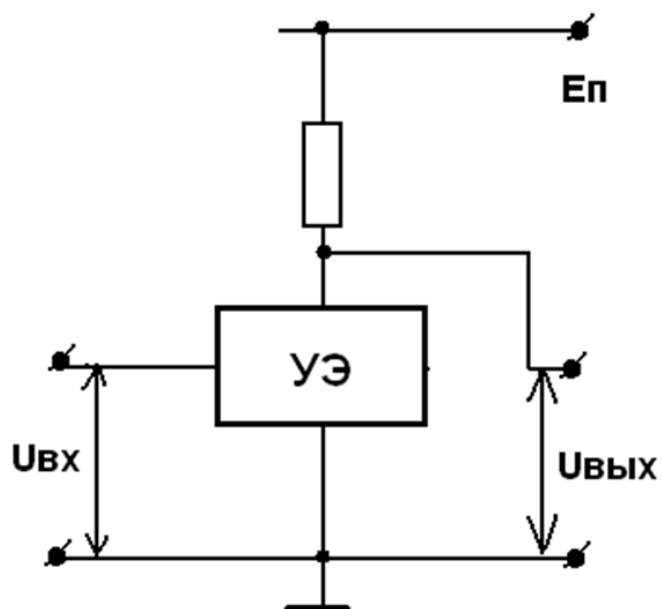
Переходные процессы в р-п-переходе.



Классификация усилителей.



Принцип построения усилителей.



Усилительный каскад ОЭ.

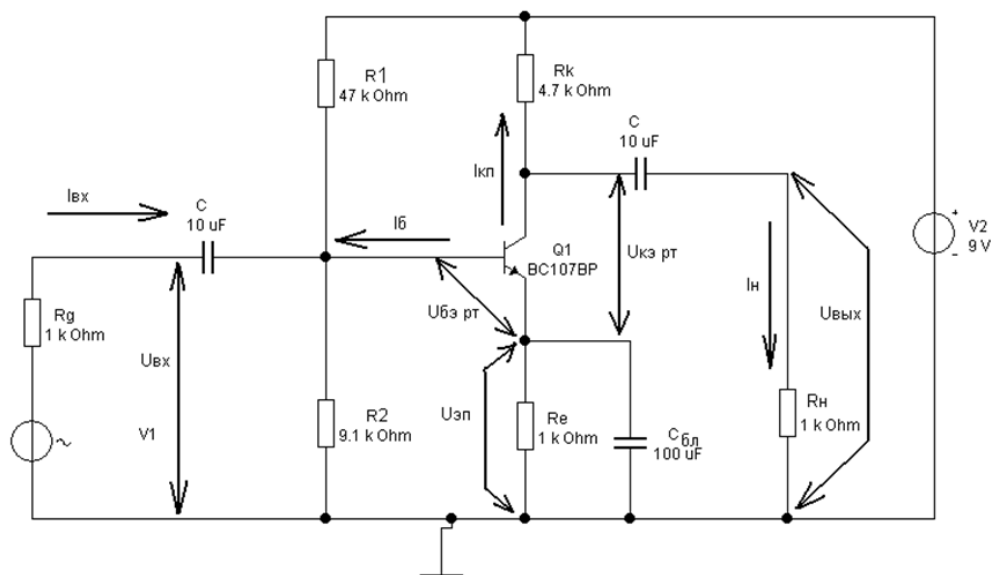
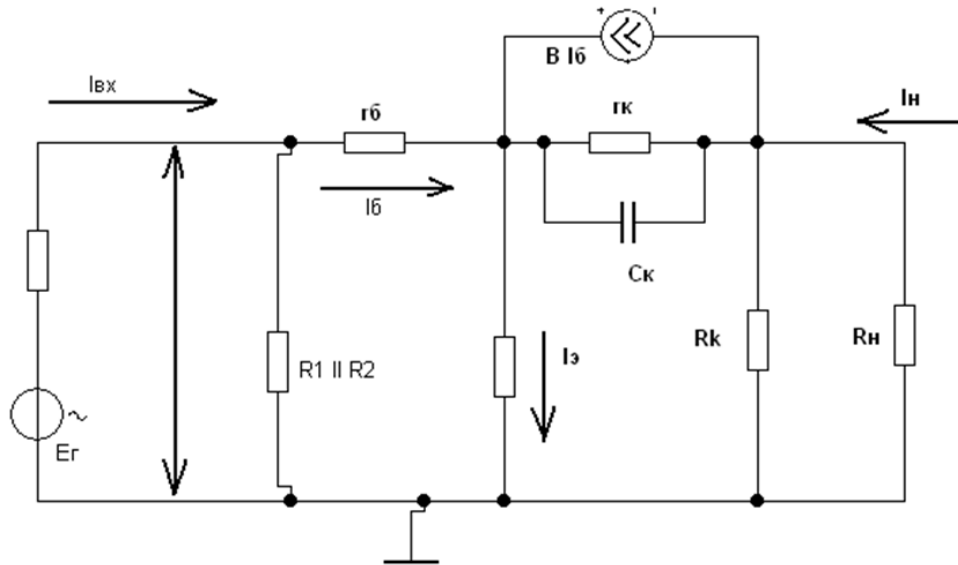
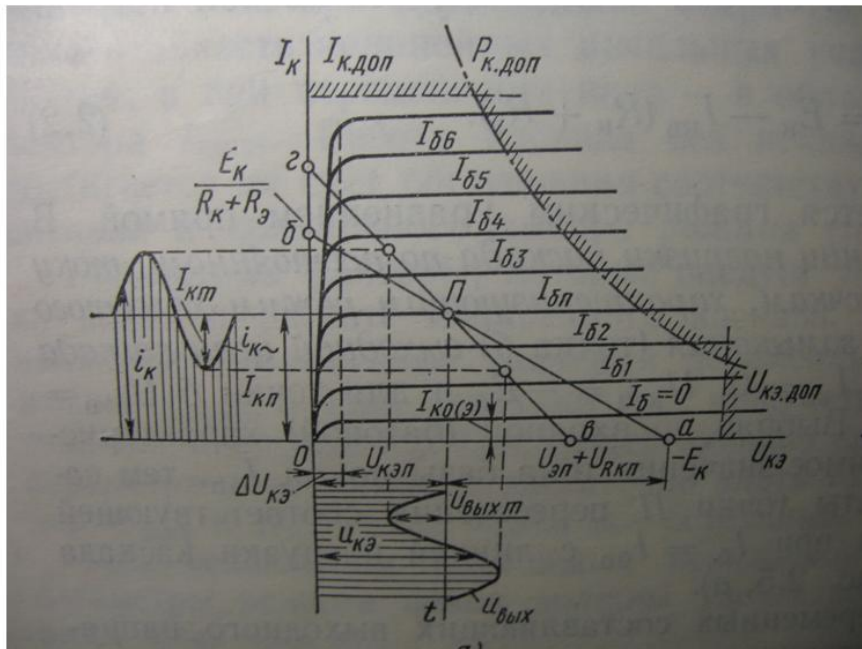


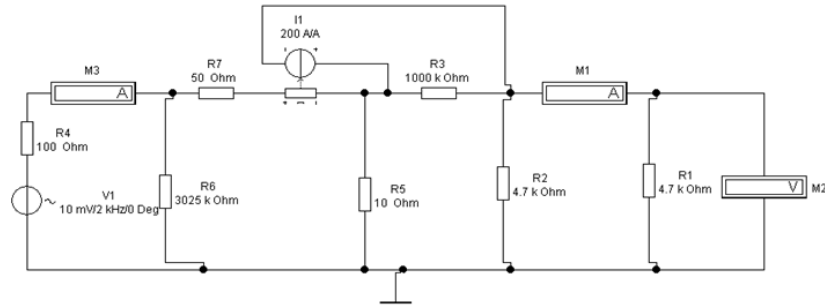
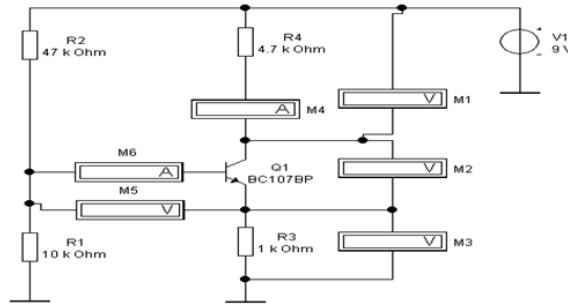
Схема замещения усилительного каскада ОЭ.



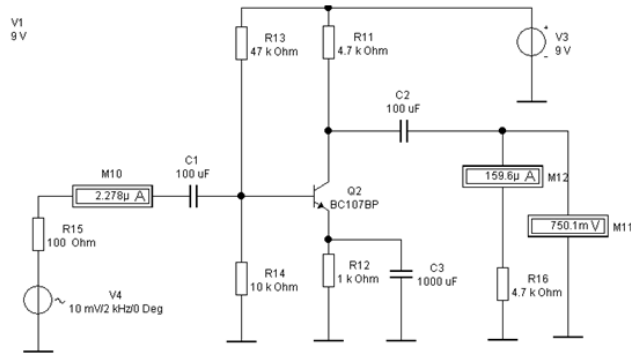
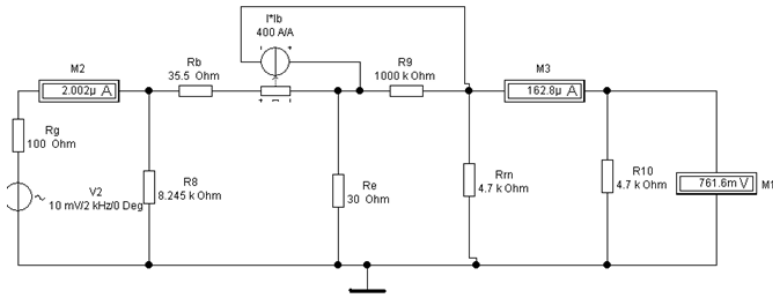
Графоаналитический метод.



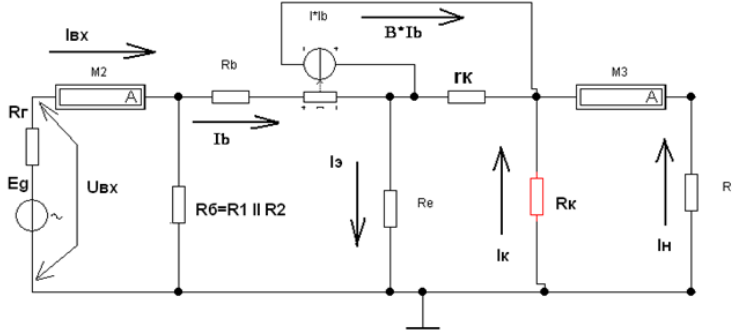
Усилительный каскад ОЭ.



Усилительный каскад ОЭ.



Усилительный каскад ОЭ.



$$R_{BX} = R_1 || R_2 || r_{BXTP}$$

$$U_{BX} = I_B r_B + I_E r_E$$

$$U_{BX} = I_E [r_B + (1 + \beta) r_E]$$

Разделим левую и правую части предыдущего уравнения на I_E

$$r_{BX} = K_I + (1 + \beta) r_E$$

Определим коэффициент усиления по току $K_I = I_E^* / I_{BX}$. Для этого

выразим ток I_E через I_{BX} .

$$I_E = I_{BX} \frac{R_{BX}}{r_{BX}}$$

Т.к. сопротивление r_E

мало его можно не учитывать.

$$I_E = \beta I_B \frac{r_E || R_H || R_K || R_{BX}}{R_H}$$

$$I_E = I_{BX} \beta \frac{R_{BX} r_E || R_H || R_K}{R_H}$$

$$K_I = \beta \frac{R_{BX} r_E || R_H || R_K}{r_{BX} R_H}$$

Если учесть, что $R_{BX} \approx r_{BX}$ и

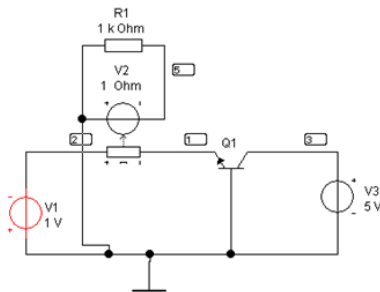
$r_E \gg R_H || R_K$, то:

$$K_I \approx \beta \frac{R_H || R_K}{R_H}$$

$$K_U = \frac{U_{BLY}}{E_T} = \frac{I_E R_H}{I_{BX} (R_T + R_{BX})} = K_I \frac{R_H}{R_T + R_{BX}}$$

$$K_U \approx \beta \frac{R_H}{R_T + R_{BX}}$$

Усилительный каскад по схеме ОБ.
Входная ВАХ биполярного транзистора.



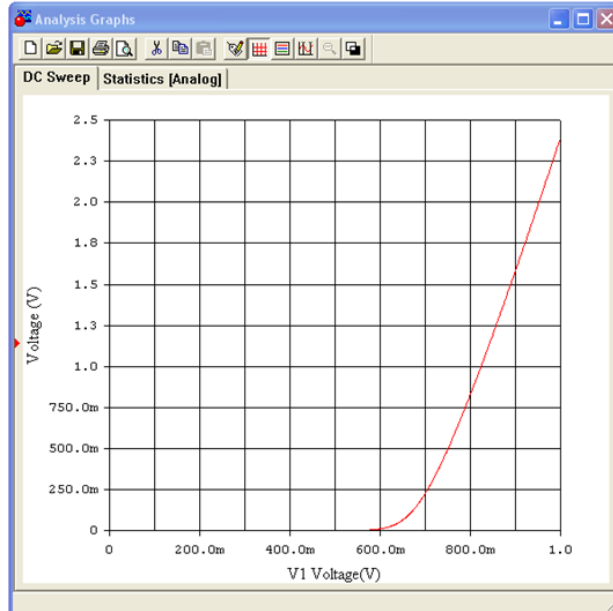
DC Sweep

Source 1
Source 1: V1
Start value: 0 V
Stop value: 1 V
Increment: 0.001 V

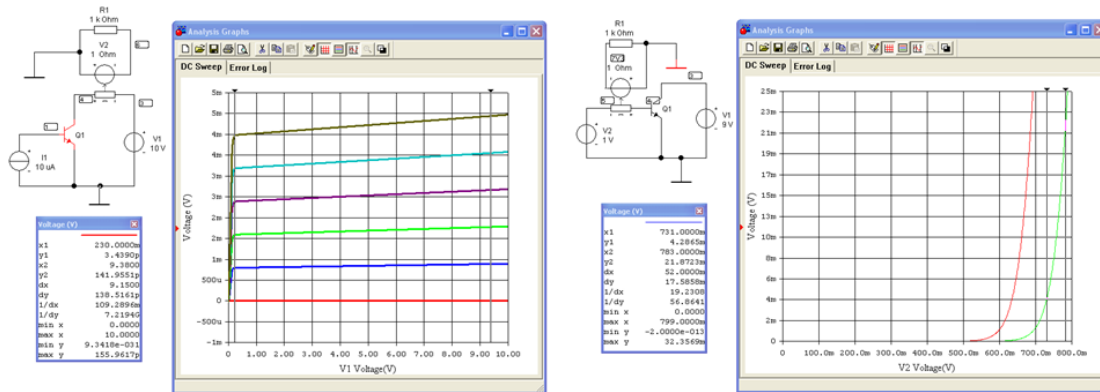
Source 2
 Use source 2
Source 2: V1
Start value: 0 V
Stop value: 1 V
Increment: 0.5 V

Output
Output node: 5

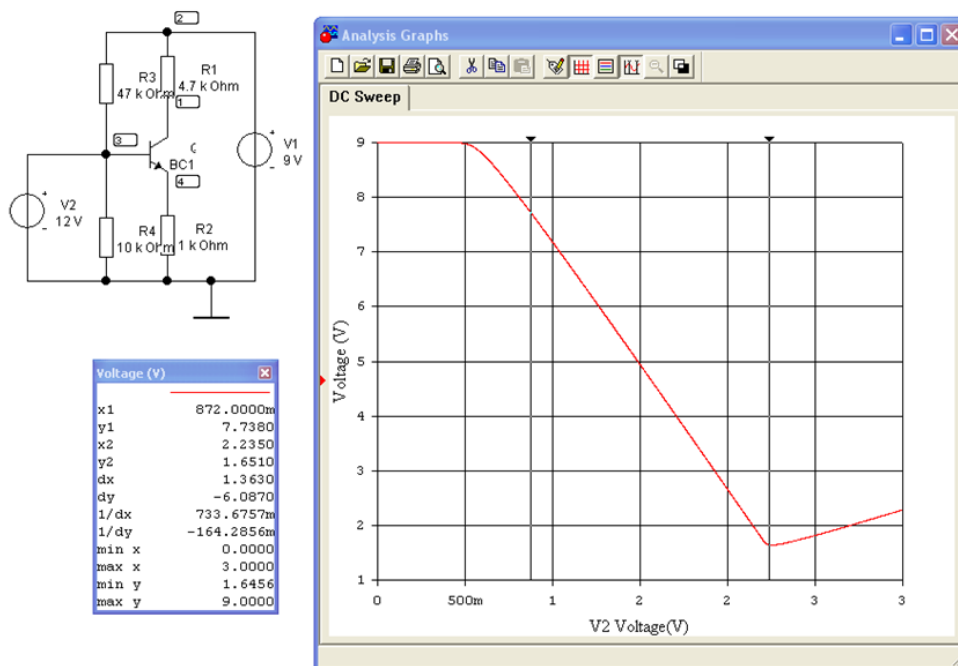
Buttons: Simulate, Accept, Cancel



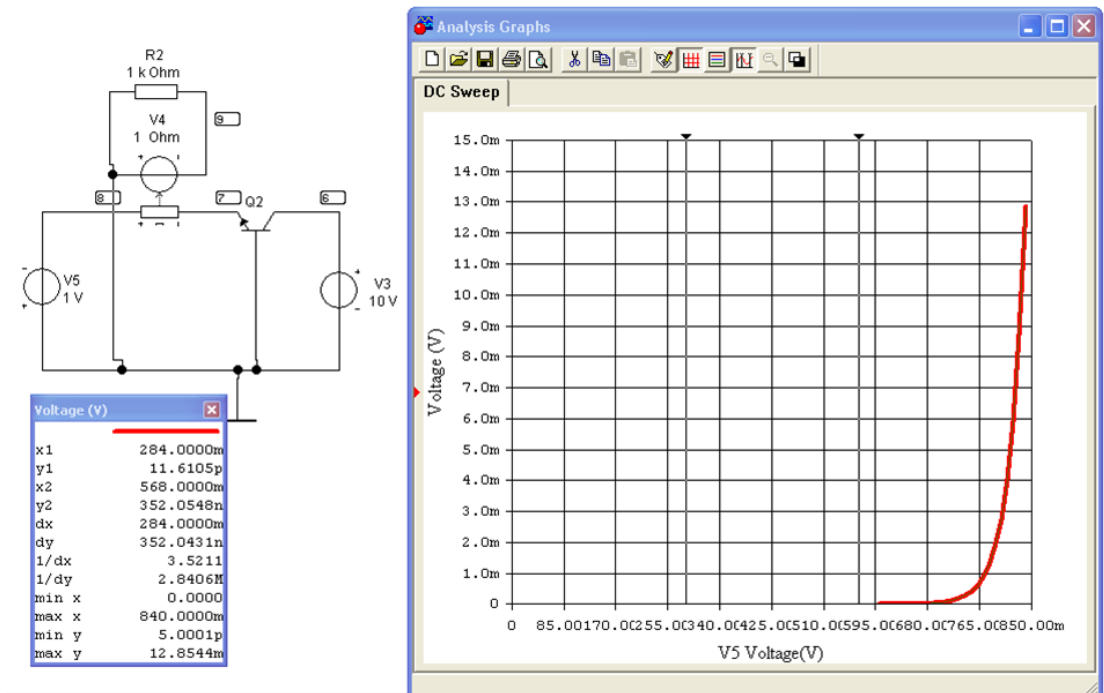
Входная и выходная ВАХ биполярного транзистора (ОЭ).



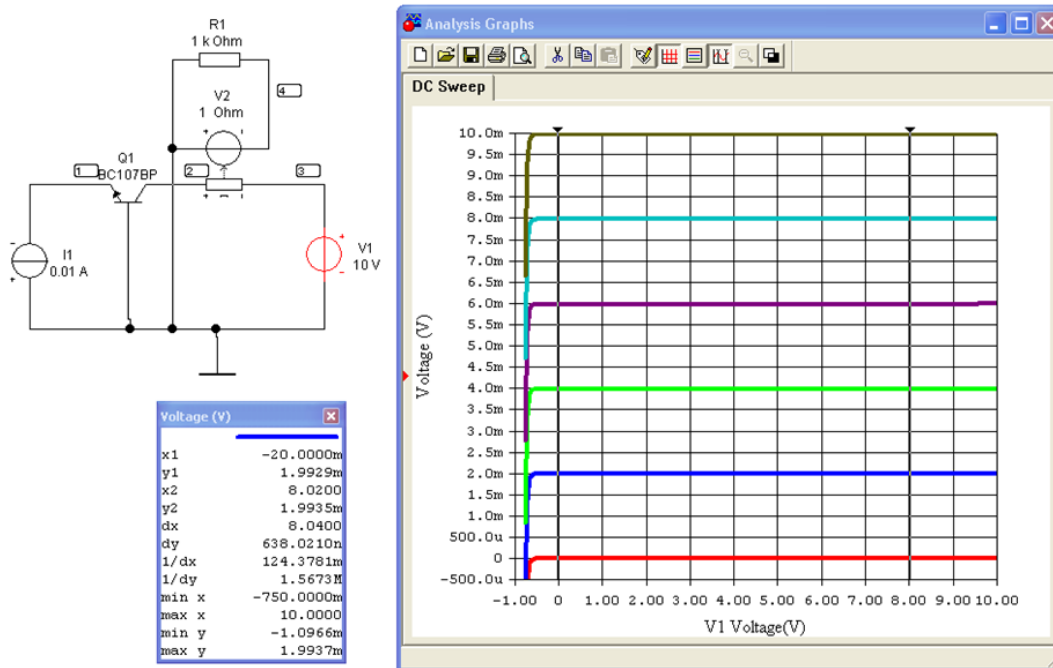
Передаточная характеристика усилительного каскада ОЭ.



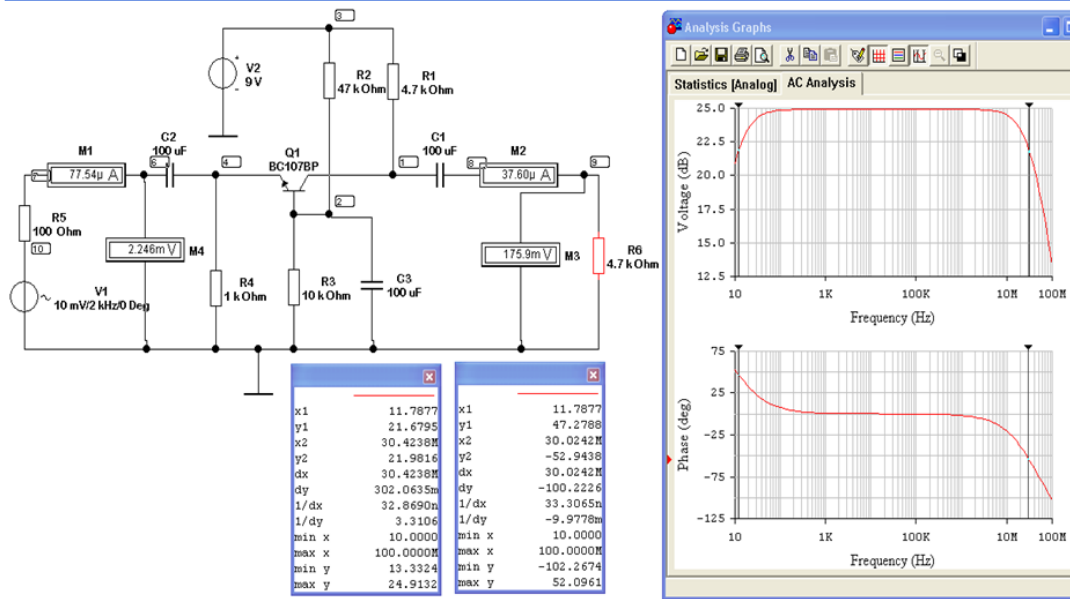
Входная ВАХ транзистора, включенного по схеме ОБ.



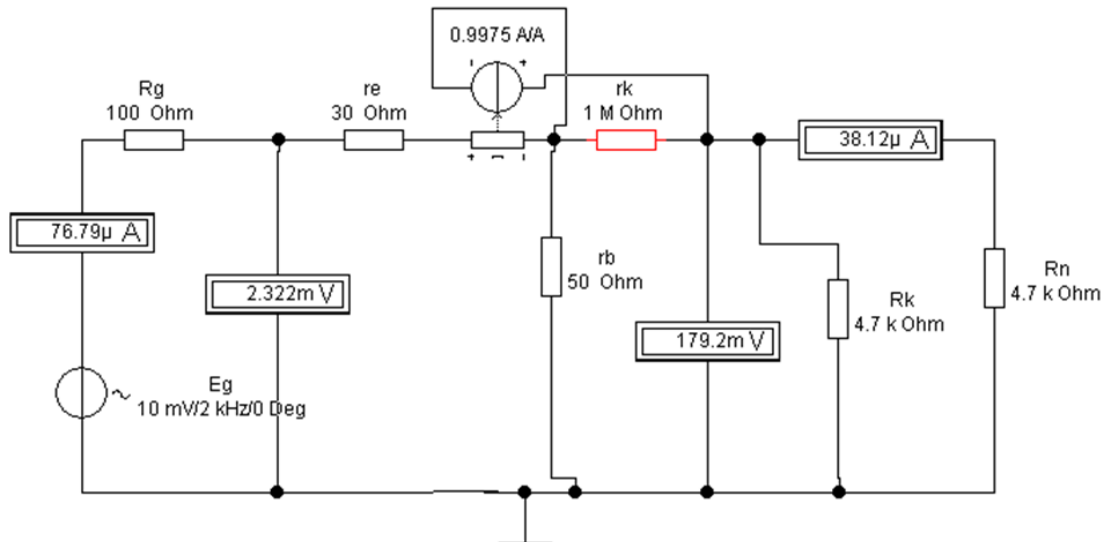
Выходная ВАХ транзистора, включенного по схеме ОБ.



Усилительный каскад ОБ.

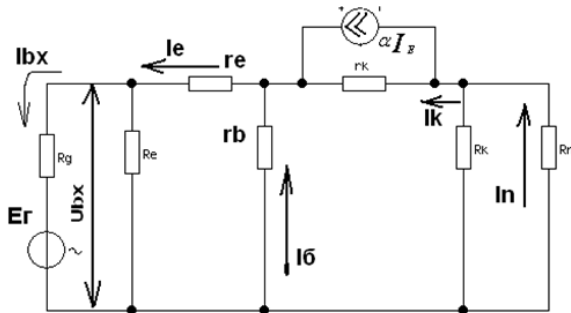


Эквивалентная схема усилительного каскада ОБ.



Усилительный каскад ОБ.

$$R_{BX} = R_{\text{Э}} \parallel [r_{\text{Э}} + (1 - \alpha) r_{\text{Б}}]$$



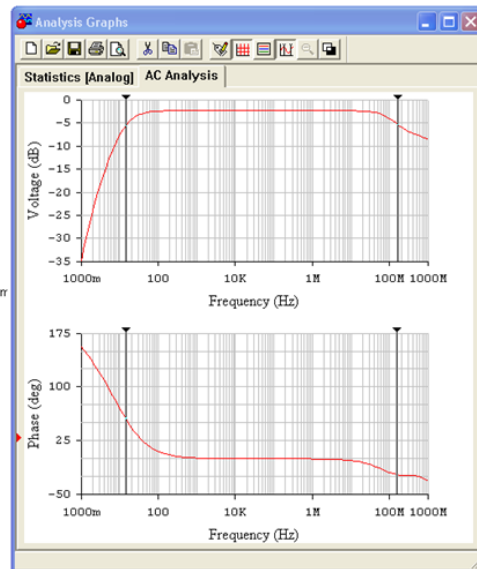
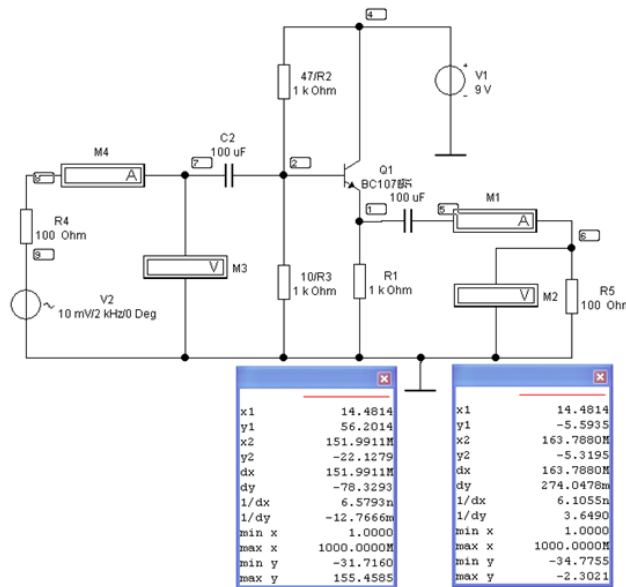
$$I_K = \alpha I_{\text{Э}}$$

$$K_I \approx \alpha \frac{R_H \parallel R_K}{R_H}$$

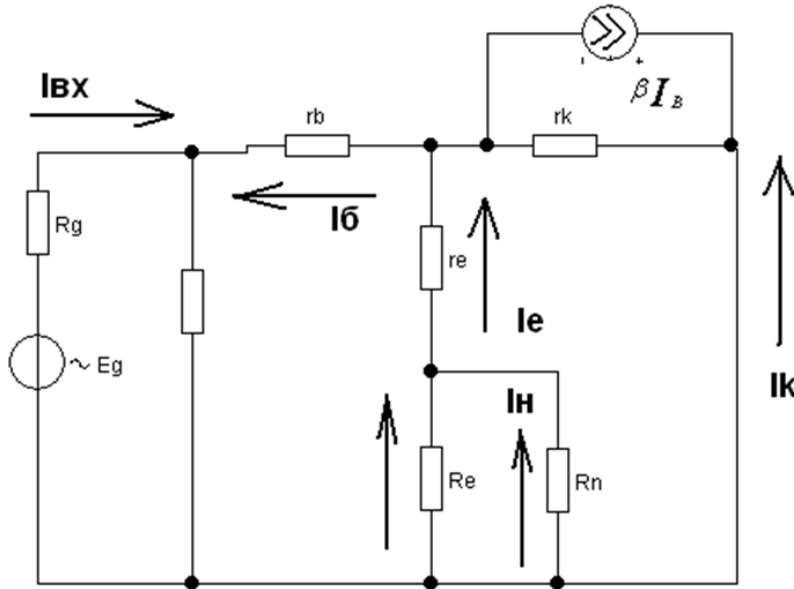
$$K_U \approx \alpha \frac{R_K \parallel R_H}{R_{\Gamma} + R_{BX}}$$

$$R_{\text{БЫХ}} = R_K \parallel r_K \approx R_K$$

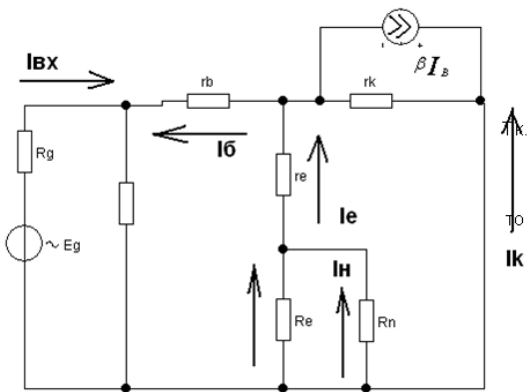
Усилительный каскад ОК.



Эквивалентная схема усилительного каскада ОК.



Усилительный каскад ОК.



$$R_{BX} = R_1 \parallel R_2 \parallel r_{BX.mp}$$

$$U_{BX} = I_B [r_B + (1 + \beta)(r_{\text{э}} + R_{\text{э}} \parallel R_H)]$$

$$r_{BX} = r_B + (1 + \beta)(r_{\text{э}} + R_{\text{э}} \parallel R_H)$$

$$R_{BX} \approx R_1 \parallel R_2 \parallel (1 + \beta)(R_{\text{э}} \parallel R_H)$$

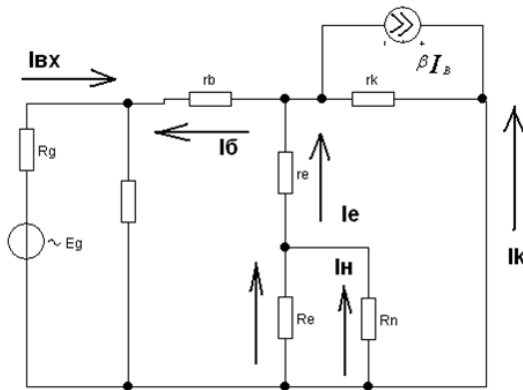
$$R_{BX} = R_1 \parallel R_2 \parallel [(1 + \beta)(R_{\text{э}} \parallel R_H)] \parallel r_K$$

$$I_H = (1 + \beta) I_B \frac{R_{\text{э}} \parallel R_H}{R_H}$$

$$I_B = I_{BX} \frac{R_{BX}}{r_{BX}}$$

$$I_H = I_{BX} (1 + \beta) \frac{R_{BX}}{r_{BX}} \frac{R_{\text{э}} \parallel R_H}{R_H}$$

Усилительный каскад ОК.



$$K_I = (1 + \beta) \frac{R_{BX} R_{\text{Э}} \parallel R_H}{r_{BX.T} R_H}$$

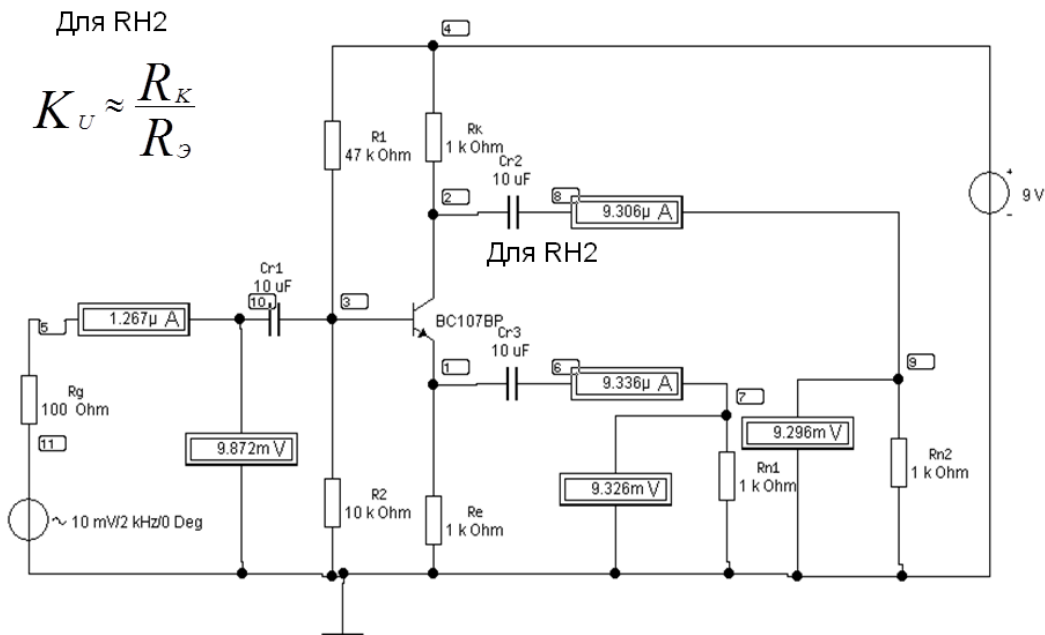
$$R_{BX} \approx r_{BX.T}$$

$$K_I \approx (1 + \beta) \frac{R_{\text{Э}} \parallel R_H}{R_H}$$

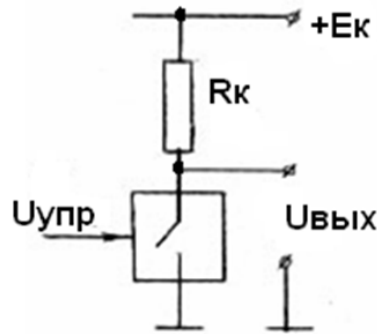
$$K_U \approx (1 + \beta) \frac{R_{\text{Э}} \parallel R_H}{R_{\Gamma} + R_{BX}}$$

$$R_{\text{ВВЛX}} = R_{\text{Э}} \parallel \left(r_{\text{Э}} + \frac{r_{\text{Б}} + R_{\Gamma} \parallel R_1 \parallel R_2}{1 + \beta} \right) \approx R_{\text{Э}} \parallel r_{\text{Э}}$$

Фазоинверсный каскад.



Ключевой режим работы биполярных транзисторов.



Ключ замкнут :

$$R_{\text{кн}} = 0$$

$$U_{\text{кн}} = 0$$

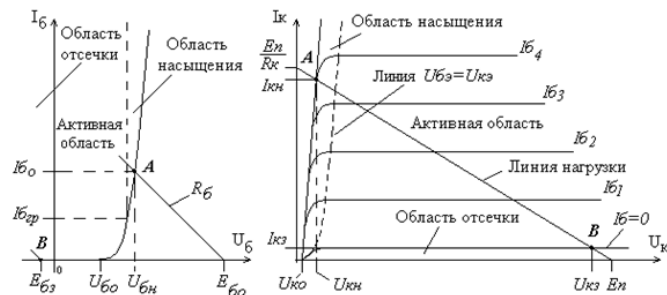
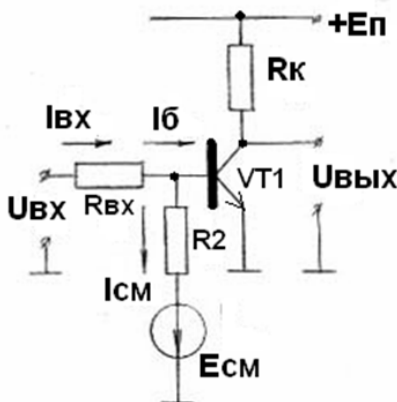
Ключ разомкнут:

$$R_{\text{кн}} = \infty$$

$$I_{\text{кн}} = 0$$

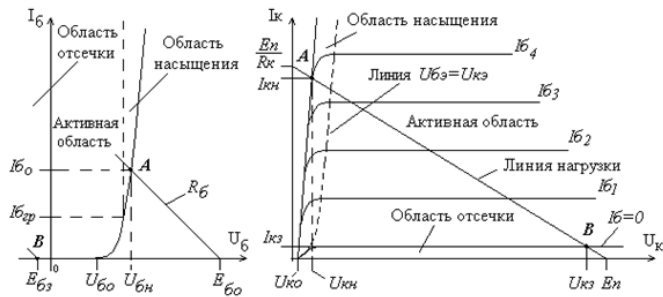
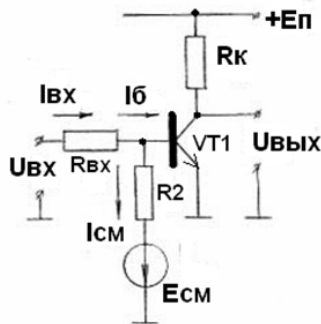
Импульсные и цифровые устройства базируются на различных переключающих схемах основой которых являются транзисторные ключи. Основное назначение транзисторных ключей состоит в размыкании и замыкании электрических цепей с помощью управляющих сигналов. Идеальный ключ имеет нулевое напряжение в замкнутом состоянии, и напряжение $U = \infty$ в разомкнутом состоянии.

Ключ на биполярном транзисторе.



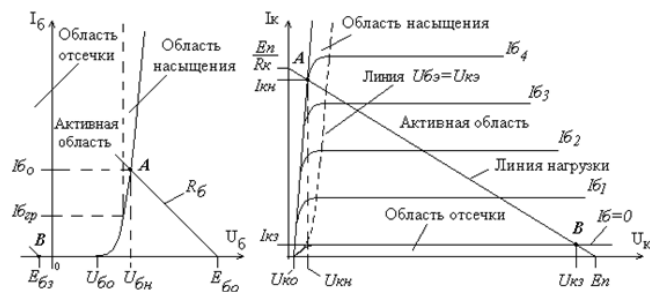
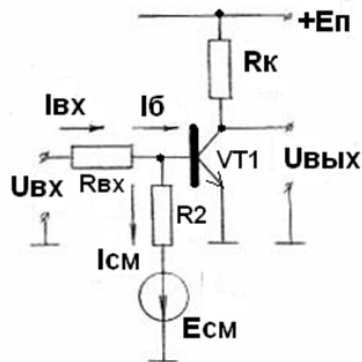
- На слайде приведены выходные ВАХ с нанесенной нагрузочной прямой **В** зависимости от величины входного сигнала рабочая точка будет находиться в одной из трех областей работы:
- область отсечки, соответствующая режиму закрытого транзистора, при котором оба перехода смещены в обратном направлении;
- область, соответствующая нормальному активному режиму (эмиттерный переход смещен в прямом направлении, а коллекторный – в обратном);
- область насыщения, соответствующая режиму открытого транзистора, при котором оба перехода смещены в прямом направлении.
- Закрытому состоянию ключа соответствует точка **В**. Ток через транзистор минимален и равен обратному току закрытого транзистора $I_{кз} = I_{к0}$.

Ключ на биполярном транзисторе.



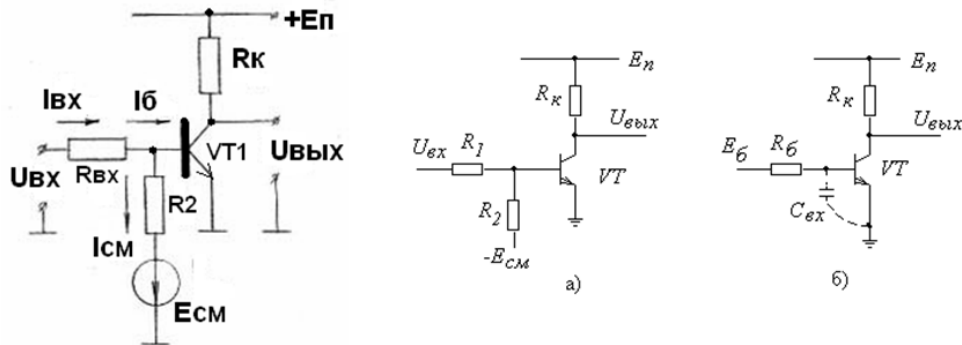
- Открытому состоянию ключа соответствует точка **A**. Напряжение на транзисторе $U_{кэ}$ в этой точке минимально и определяется напряжением насыщения транзистора $U_{кн}$, а ток максимален и равен $I_{кн} \approx Eп/Rк$.
- В цифровых устройствах схема ключа применяется как логический элемент - инвертор, где выходное напряжение снимается с коллектора транзистора. Поэтому в открытом состоянии (точка **A**) $U_{вых} = U_{вых\ мин} = U_{кн}$, а в закрытом (точка **B**) - $U_{вых} = U_{вых\ макс} \approx Eп$. Максимальное напряжение $U_{вых\ макс}$ соответствует напряжению логической единицы $U1_{вых}$, а минимальное $U_{вых\ мин}$ - напряжению логического нуля $U0_{вых}$.

Ключ на биполярном транзисторе.



Из рисунка на слайде видно, что для получения двух фиксированных уровней $U1_{вых}$ и $U0_{вых}$ необходимо подать на вход такой сигнал, который обеспечивал бы переход транзистора из режима отсечки в режим насыщения и обратно. При этом рабочая точка перемещается из положения **B** (область отсечки) в положение **A** (область насыщения). Этот переход осуществляется через активную область. Таким образом, активная область работы транзистора, являющаяся основной рабочей областью для усилительных схем, служит переходной областью для ключевых элементов.

Ключ на биполярном транзисторе.



Режим отсечки. В режиме отсечки оба перехода биполярного транзистора (эмиттерный и коллекторный) смещены в обратном направлении. Токи в транзисторе равны: $I_b \approx -I_{ko}$, $I_k = I_{ko}$, $I_э \approx 0$. В зависимости от типа транзистора, технологии его изготовления обратный ток закрытого транзистора I_{ko} лежит в пределах от 0,1мА до 1нА. Поэтому транзистор в режиме отсечки можно заменить эквивалентной схемой, показанной на данном слайде (а). Для транзисторов интегральных схем обратными токами можно пренебречь ($I_{ko} = 0$). Тогда эквивалентная схема еще более упростится.

Переходные области для ключевых элементов.



- Для обеспечения режима обратного смещения эмиттерного перехода в схему ключа добавлена цепь $E_{см} - R_2$. (Полярность источника $E_{см}$ такова, что в отсутствие входного сигнала он запирает транзистор.) Условие запираения транзистора записывается следующим образом:

$$U_{бэ} = \frac{\frac{U_{вх}}{R_1} - \frac{E_{см}}{R_2} + I_{кэ}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} < 0 \quad (1)$$

- При очень малых обратных токах коллектора в практических случаях допускается работа не в режиме отсечки, а в активном режиме. Этот режим обеспечивается при $U_{бэ} < U_{бо}$, где $U_{бо}$ – напряжение отсечки, определяемое по входной характеристике транзистора.

$$U_{бэ} = \frac{\frac{U_{вх}}{R_1} - \frac{E_{см}}{R_2} + I_{кэ}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} < U_{бо} \quad (2)$$

- Для кремниевых транзисторов $U_{бо} \approx 0,5...0,6В$, а для германиевых - $U_{бо} \approx 0,2...0,3В$. В этом случае необходимость в источнике $E_{см}$ отпадает. Тогда условие запираения транзистора (1) можно переписать так:

$$U_{бэ} = \frac{U_{вх} \cdot R_2}{R_1 + R_2} < U_{бо} \quad (3)$$

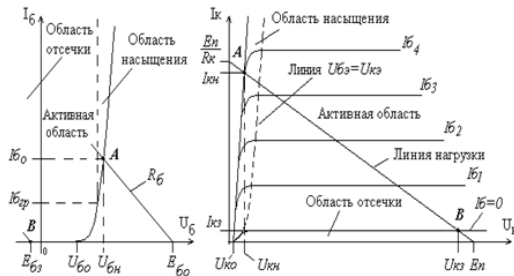
- Режим насыщения. В режиме насыщения оба перехода биполярного транзистора (эмиттерный и коллекторный) смещены в прямом направлении. Для прямого смещения эмиттерного перехода надо обеспечить правильную полярность входного сигнала. Смещение же коллекторного перехода в прямом направлении обеспечивается величиной входного сигнала. Можно показать, что для обеспечения насыщения отпирающий базовый ток транзистора $I_{бо}$ должен удовлетворять токовому критерию насыщения (1)

$$I_{бо} \geq I_{бэп} = \frac{I_{кн}}{\beta} \approx \frac{E_n}{\beta \cdot R_k} \quad (4)$$

- где β – усредненное значение коэффициента передачи тока базы в коллектор, $I_{бэп}$ – ток базы на границе насыщения и активного режима.
- В режиме насыщения ток коллектора слабо зависит от входного тока и определяется значением $I_{кн} \approx E_n/R_k$. При этом в базе транзистора непосредственно у коллекторного перехода происходит накопление избыточного заряда, что и приводит к отпираению коллекторного перехода.
- Глубина насыщения транзистора определяется коэффициентом, называемым степенью насыщения $S_{бк}$, равным

$$S_{бк} = \frac{I_{бэ} - I_{бэп}}{I_{бэп}} \quad (5)$$

Ключ на биполярном транзисторе.



- **Режим насыщения.** В режиме насыщения оба перехода биполярного транзистора (эмиттерный и коллекторный) смещены в прямом направлении. Для прямого смещения эмиттерного перехода надо обеспечить правильную полярность входного сигнала. Смещение же коллекторного перехода в прямом направлении обеспечивается величиной входного сигнала. Можно показать, что для обеспечения насыщения отпирающий базовый ток транзистора $I_{б0}$ должен удовлетворять токовому критерию насыщения (1)

$$I_{б0} \geq I_{б2р} = \frac{I_{кн}}{\beta} \approx \frac{E_n}{\beta \cdot R_k},$$

- где β – усредненное значение коэффициента передачи тока базы в коллектор,
- $I_{б2р}$ – ток базы на границе насыщения и активного режима.

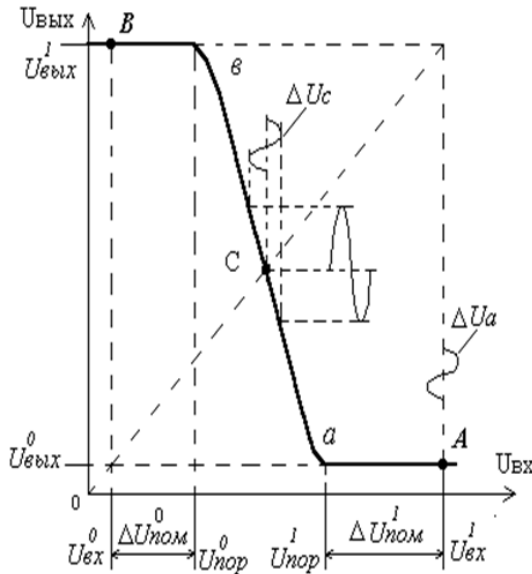
Ключ на биполярном транзисторе.

- В режиме насыщения ток коллектора слабо зависит от входного тока и определяется значением $I_{кн} \approx E_n/R_k$. При этом в базе транзистора непосредственно у коллекторного перехода происходит накопление избыточного заряда, что и приводит к отпираанию коллекторного перехода.
- Глубина насыщения транзистора определяется коэффициентом, называемым степенью насыщения $S_{бк}$, равным

$$S_{бк} = \frac{I_{б} - I_{б2р}}{I_{б2р}}. \quad (5)$$

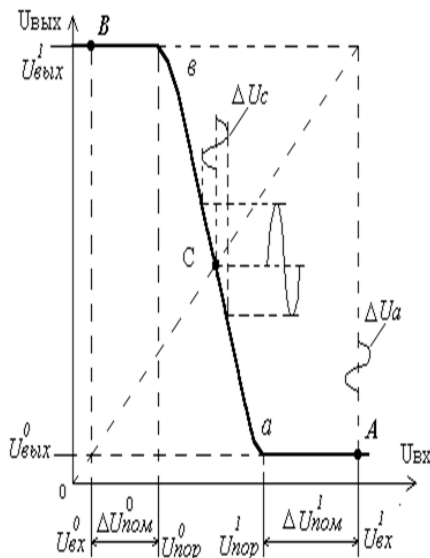
- Из вольт-амперных характеристик биполярного транзистора видно, что в режиме насыщения напряжение на коллекторе $U_{кз}$ практически не зависит от входного сигнала. В зависимости от типа транзистора $U_{кн}=0,01...0,3В$. Аналогично, напряжение $U_{бэ}$ мало меняется и равно $U_{бн}=0,5...0,8В$. Для транзисторов интегральных схем можно считать $U_{кн} = 0,1В$ и $U_{бн}=0,7В$. Это позволяет заменить транзистор в режиме насыщения эквивалентной схемой, показанной на рис. 7,а. Если амплитуда входного сигнала такова, что $U_{вх} \gg U_{бн}$, а напряжение источника питания $E_n \gg U_{кн}$, то можно считать $U_{кн} = U_{бн} = 0$. Тогда эквивалентная схема существенно упрощается. Говорят, что транзистор в режиме насыщения «стянут в точку».

Передаточная характеристика ключа на биполярном транзисторе.



• В электронном ключе два его рабочих состояния (разомкнутое и замкнутое) соответствуют точкам *A* и *B*. В точке *B* ключ разомкнут и ток через него практически равен нулю, а в точке *A* ключ замкнут и падение напряжения на нем близко к нулю. Входные и выходные сигналы в ключе принимают только два значения: либо $U_{вх}^0$ и $U_{вых}^0$, либо $U_{вх}^1$ и $U_{вых}^1$. Форма передаточной характеристики между точками *A* и *B* несущественна. Отсюда следует, что ключи, а значит, и цифровые схемы мало чувствительны к разбросу параметров, к их температурному и временному дрейфу, а также к внешним электромагнитным наводкам и собственным шумам. Последний вывод проиллюстрирован на данном слайде. Небольшие колебания напряжения ΔU_a около точки *A* практически не меняют значения выходного сигнала, а значит и не влияют на работу ключа.

Передаточная характеристика ключа на биполярном транзисторе.



• Практически передаточная характеристика ключа на биполярном транзисторе представляет три прямолинейных участка, соответствующих разным режимам работы транзистора.

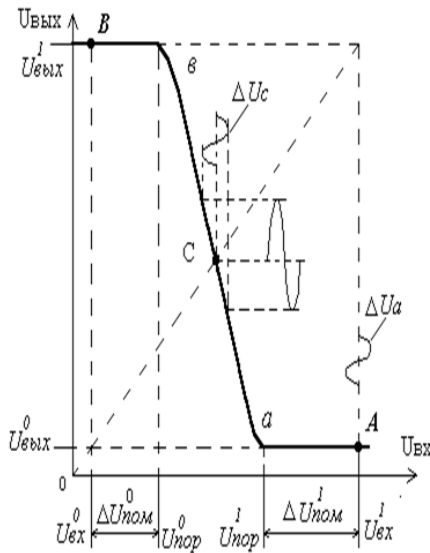
• Первый участок ($U_{вх} < U_{пор}^0$) соответствует закрытому состоянию транзистора. В этом случае выходное напряжение равно $U_{вых} = U_{вых\ макс} \approx E_n$. При входном напряжении $U_{вх} = U_{пор}^0$ транзистор из закрытого состояния переходит в активный режим. Поэтому напряжение $U_{пор}^0$ называется порогом отпирания схемы, которое можно определить из уравнения (2)

$$U_{пор}^0 = U_{бэ} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) + E_{см} \cdot \frac{R_1}{R_2} - I_{кэ} \cdot R_1 \quad (6)$$

• Следующий участок передаточной характеристики ($U_{пор}^0 < U_{вх} < U_{пор}^1$) соответствует активному режиму работы транзистора. В этом случае выходное напряжение схемы определяется соотношением

$$U_{вых} = E_n - I_{к} \cdot R_{к} = E_n - \beta \cdot I_{б} \cdot R_{к} \quad (7)$$

Передаточная характеристика ключа на биполярном транзисторе.

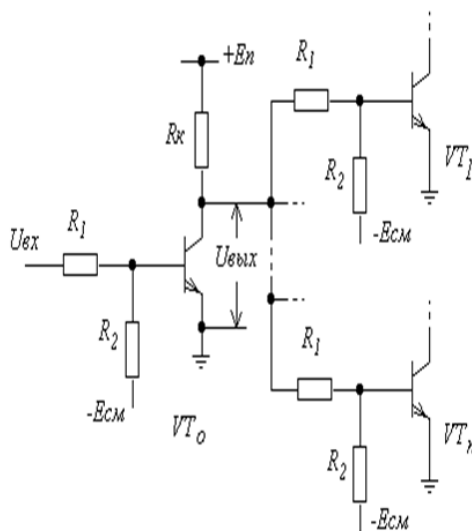


Выразив ток I_b через входное напряжение $U_{вх}$ можно получить аналитическое выражение передаточной характеристики для активной области.

Следующий участок передаточной характеристики соответствует входному напряжению $U_{вх} > U_{1пор}$. На этом участке транзистор работает в режиме насыщения и поэтому $U_{вых} = U_{0вых} = U_{кн}$. Напряжение $U_{вх} = U_{1пор}$ соответствует границе активного режима и режима насыщения и называется порогом запираения схемы, так как при уменьшении входного напряжения ниже $U_{1пор}$ схема выключается. Пороговое напряжение $U_{1пор}$ можно определить из токового критерия насыщения (4):

$$U_{пор}^1 = U_{бн} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) + E_{см} \cdot \frac{R_1}{R_2} + I_{бзр} \cdot R_1 \quad (8)$$

Нагрузочная способность ключевых схем.



Рассмотренная передаточная характеристика инвертора соответствует режиму холостого хода. Однако в практических случаях к выходу логического элемента подключены входы других схем.

- Если на входе первого инвертора напряжение $U_{вх} > U_{1пор}$, то транзистор VT_0 открыт и насыщен и $U_{вых} = U_{0вых} = U_{кн} \approx 0В$. Поэтому все транзисторы остальных инверторов будут закрыты.
- Если же на вход первого инвертора подать напряжение $U_{вх} < U_{0пор}$, то транзистор VT_0 закроется. Однако выходное напряжение уже не равно $U_{вых} = U_{1вых макс} \approx E_n$. Можно показать, что в этом случае выходное напряжение зависит от числа подключенных нагрузок:

$$U_{вых}^1 = \frac{U_{бн} + E_n \cdot \frac{R_1}{n \cdot R_к}}{1 + \frac{R_1}{n \cdot R_к}} \quad (9)$$

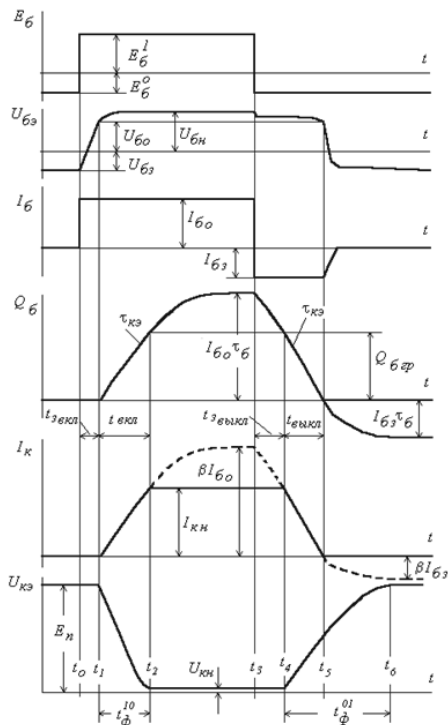
Помехоустойчивость.

- В цифровых схемах обычно обеспечивается совместимость (согласование) входных и выходных сигналов, т. е. совпадение по уровням $U_{0вх}$ и $U_{0вых}$, $U_{1вх}$ и $U_{1вых}$. Передаточная характеристика позволяет наглядно оценить помехоустойчивость устройств, т. е. найти максимально допустимое напряжение помехи, действующей на входе ключа наряду с регулярным сигналом, при которой еще не происходит изменение логических (информационных) состояний схемы.
- Так для закрытой схемы (точка B) опасной будет положительная помеха, способная открыть схему. Запас помехоустойчивости на отпирание схемы
- $\Delta U_{0пом} = U_{0пор} - U_{0вх} = U_{0пор} - U_{0вых}$. (11)
- А для открытой схемы (точка A) отрицательная помеха может закрыть транзистор. Запас помехоустойчивости на запираение схемы
- $\Delta U_{1пом} = U_{1вх} - U_{1пор} = U_{1вых} - U_{1пор}$. (12)

Переходные процессы.

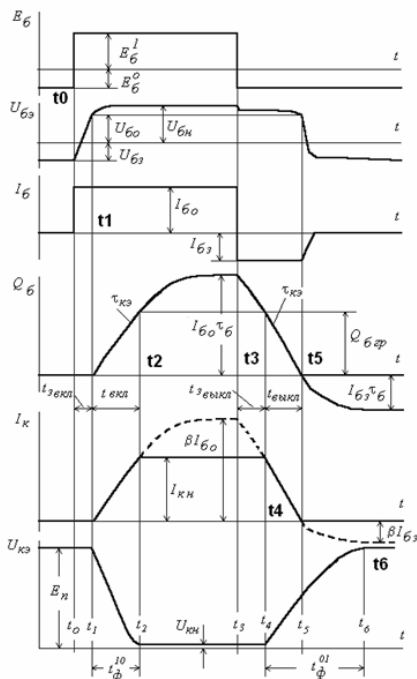
Переключение ключа из закрытого состояния в открытое и обратно не может произойти мгновенно. Связано это с инерционностью биполярного транзистора, обусловленной наличием емкостей переходов, конечным временем переноса заряда от эмиттера к коллектору и накоплением заряда носителей в базе.

Включение ключа.



Пусть в исходном состоянии ключ закрыт, транзистор заперт некоторым обратным напряжением $U_{бэ} < 0$. Рассмотрим процесс включения при подаче на вход схемы в момент времени t_1 отпирающего напряжения. Весь процесс включения условно можно разбить на три этапа: задержка включения ($t_0 \dots t_1$), формирование фронта ($t_1 \dots t_2$) и накопление заряда ($t_2 \dots t_3$).

Задержка включения.

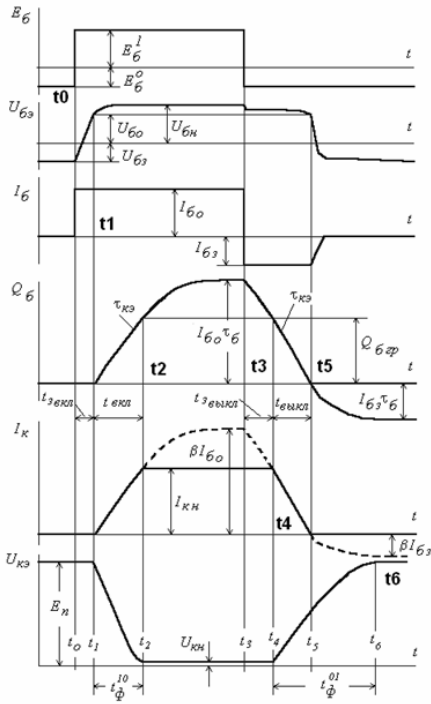


• Этот первый этап переходного процесса обусловлен зарядом входной емкости запертого транзистора. Заряд емкости начинается после того, как управляющее напряжение скачком меняет свое значение от $E_{б0}^0$ до $E_{б0}^1$. Процесс заряда описывается уравнением

$$U_{бэ}(t) = E_{бэ}^1 - (E_{бэ}^1 - E_{бэ}^0) \cdot \exp(-t / \tau_c)$$

- (13)
- где $\tau_c = C_{вх} R_{б}$ – постоянная времени заряда.

Задержка включения.



Когда напряжение U_b , нарастая, становится равным напряжению U_{bo} , отпирается эмиттерный переход транзистора и U_b практически больше не меняется. Значит, время задержки включения $t_{з.вкл}$ можно найти, полагая $U_b(t_{з.вкл}) = U_{bo}$. Оно выражается следующим образом:

$$t_{з.вкл} = \tau_c \cdot \ln \frac{E_b^1 - E_b^0}{E_b^1 - U_{bo}} \quad (14)$$

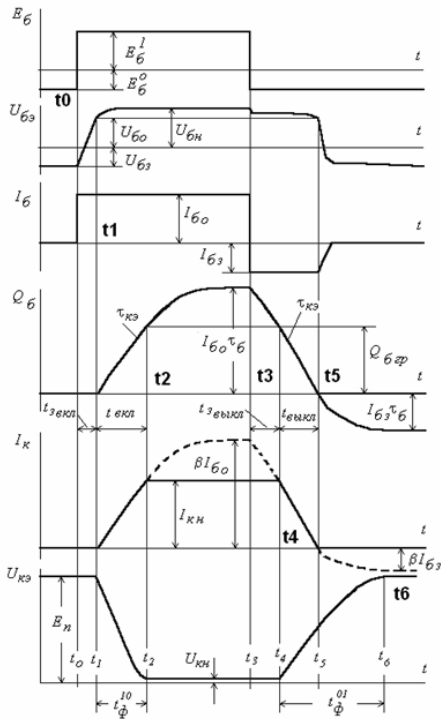
Обычно $|U_{bz}| \ll U_{bo}$ и $U_{bo} \ll E_b^1$. Поэтому

$$t_{з.вкл} \approx C_{вх} (U_{bo} - U_{bz}) / I_{вх0} \quad (15)$$

где $I_{вх0} = E_b^1 / R_b \approx \text{const}$ - входной отпирающий ток. Входную емкость принимают равной сумме барьерных емкостей эмиттерного и коллекторного переходов:

$$C_{вх} = C_{э} + C_{к}$$

Формирование фронта.



С момента отпираания эмиттерного перехода транзистора, в базовой цепи устанавливается ток

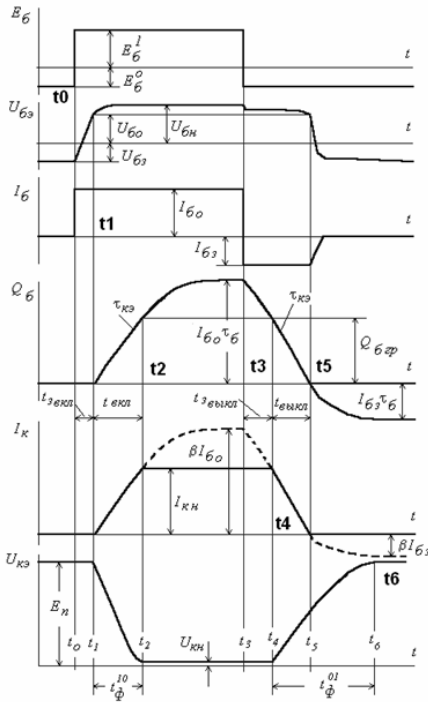
$$i_b(t) = I_{вх0} = I_{bo} \approx \text{const} \quad (17)$$

Поэтому можно считать, что нарастание коллекторного тока и спад коллекторного напряжения на этом этапе переходного процесса происходят в условиях заданного тока базы. Из зарядовой модели транзистора для активного режима коллекторный ток $i_k(t)$ и базовый заряд неосновных носителей $Q_b(t)$ (например, заряд электронов для p -базы) связаны между собой соотношением:

$$i_k(t) = \frac{Q_b(t)}{\tau_k}(t) = \frac{\beta}{\tau_b} \cdot Q_b(t) \quad (18)$$

где τ_b - постоянная времени накопления неосновных носителей в базе.

Формирование фронта.



Закон изменения заряда в базе можно найти из уравнения баланса заряда :

$$\frac{dQ_6}{dt} = -\frac{Q_6}{\tau_6} + i_6 \quad (19)$$

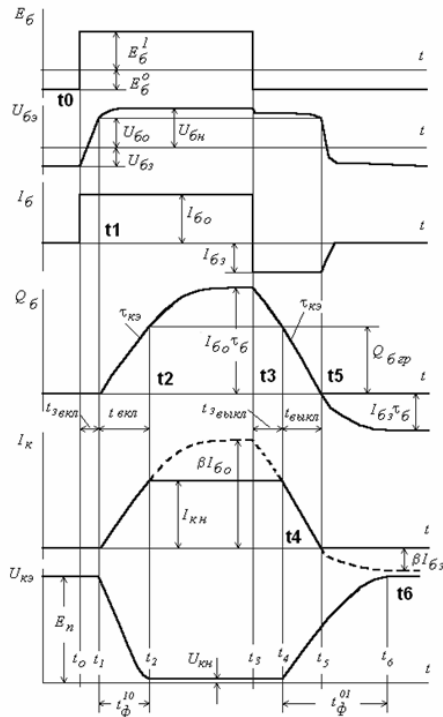
С учетом вышесказанного можно показать, что коллекторный ток i_k будет меняться экспоненциально:

$$i_k(t) = \beta \cdot I_6 (1 - \exp(-t/\tau_6)) \quad (20)$$

С учетом перезаряда емкости коллекторного перехода C_k и емкости нагрузки C_H эквивалентная постоянная времени для тока будет определяться суммой

$$\tau_{кэ} = \tau_6 + R_k(C_k(1 + \beta) + C_H)$$

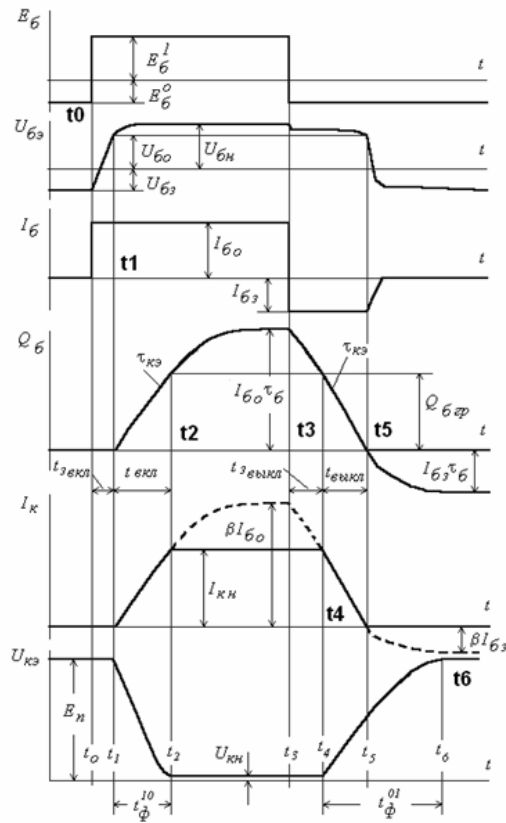
Формирование фронта.



Асимптотическое значение ток не может быть достигнуто, так как в момент t_2 ток достигает значения $I_{кН}$, после чего транзистор переходит из активного режима в режим насыщения и, следовательно, теряет силу соотношение (18). Длительность фронта легко найти из (20), подставляя $i_k(t) = I_{кН}$

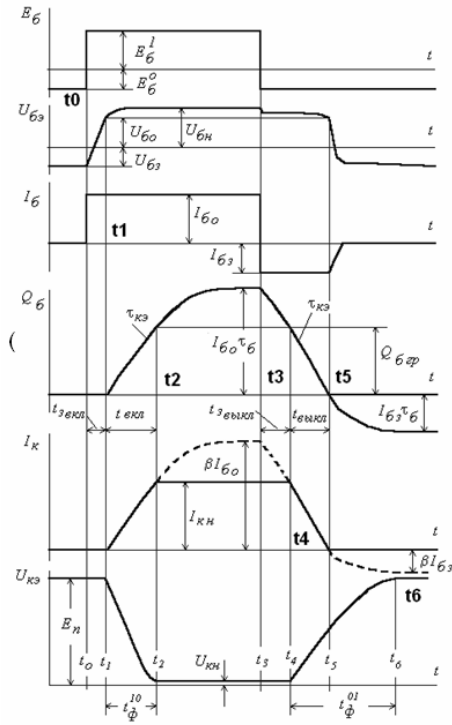
$$t_{\phi} = t_{\phi}^{10} = t_{\phi}^{-} = \tau_{кэ} \cdot \ln \frac{\beta \cdot I_{60}}{\beta \cdot I_{60} - I_{кН}} \quad (21)$$

Накопление заряда.



После того как транзистор начал работать в режиме насыщения, токи транзистора практически не меняются. Однако заряд в базе продолжает нарастать до уровня $I_{б0} \cdot \tau_{бн}$,

где $\tau_{бн} \approx (0,7...0,9) \cdot \tau_{б}$ - постоянная времени накопления в режиме насыщения. За время $3\tau_{б}$ процесс накопления заряда, и транзистор войдет в стационарный режим.

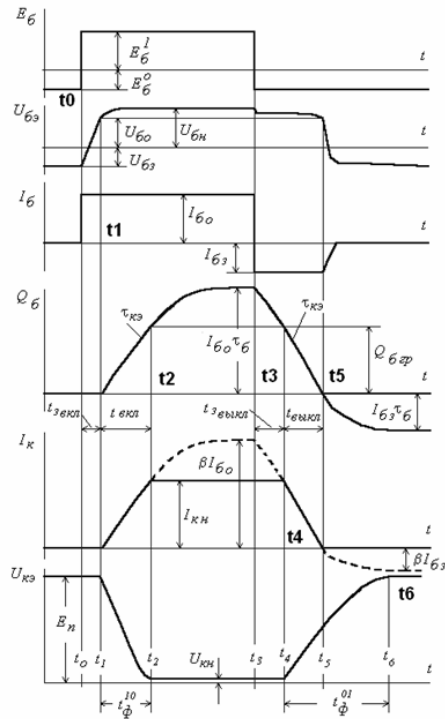


Выключение ключа. Процесс выключения ключа протекает в два этапа: задержка выключения ($t_4...t_5$) и формирование среза выходного сигнала ($t_5...t_6$).

Задержка выключения. Пусть в момент t_4 на входе насыщенного ключа управляющее напряжение скачком меняется от $E_б^1$ до $E_б^0$. Тогда ток базы скачком изменится от положительного уровня $I_б0$ до отрицательного $I_б3 = (E_б^0 - U_бэ) / R_б \approx \text{const}$

Отрицательный ток приводит к уменьшению (рассасыванию) заряда, накопленного в базе. Однако, пока заряд в базе $Q_б > Q_бзр$ $Q_бзр = I_бзр \cdot \tau_б$ - заряд в базе транзистора, работающего на границе активного режима и режима насыщения), коллекторный ток и напряжение не меняются.

Задержка выключения.



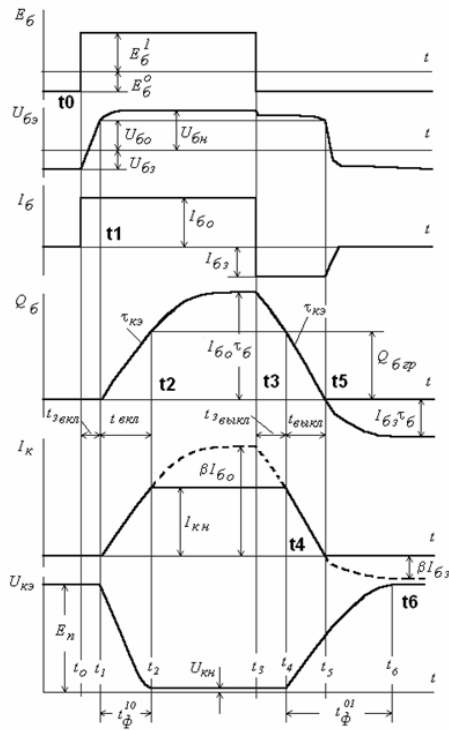
- Длительность этапа рассасывания t_{pac} определяется временем, в течение которого заряд $Q_б$ уменьшается от исходного уровня $Q_б(t_5) = I_б0 \cdot \tau_б$ до граничного: $Q_бзр$

$$t_{pac} = t_3^{01} = \tau_б \cdot \ln \frac{Q_б(\infty) - Q_б(t_5)}{Q_б(\infty) - Q_б(t_6)} = \tau_б \cdot \ln \frac{|I_б3| + I_б0}{|I_б3| + I_бзр}$$

- Следовательно, задержка выключения, обусловленная рассасыванием избыточного заряда в базе, тем меньше, чем меньше степень насыщения транзистора и больше запирающий ток.

(22)

Фронт выходного сигнала.



• В момент завершения рассасывания избыточного заряда транзистор переходит в активный режим. С этого момента начинается спад коллекторного тока по экспоненциальному закону с постоянной времени $\tau_б$ от начального значения $I_{кн}$. Длительность спада импульса коллекторного тока определяется соотношением:

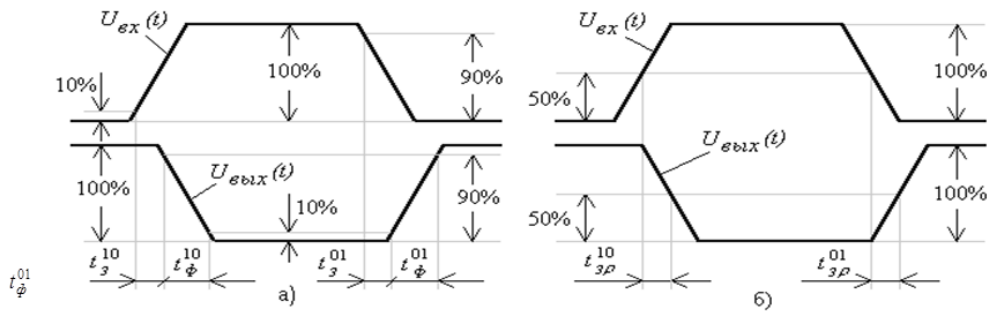
$$t_c = t_{\phi}^{01} = \tau_{кэ} \cdot \ln \frac{Q_0(\infty) - Q_0(t_6)}{Q_0(\infty) - Q_0(t_7)} = \tau_{кэ} \cdot \ln \frac{|I_{\bar{o}3}| + I_{\bar{o}2p}}{|I_{\bar{o}3}|} \quad (23)$$

Подключение к выходу ключа Сн.

Если ключ работает на емкостную нагрузку, то длительность среза тока и напряжения будут существенно различаться. Справедливо это для высокочастотных транзисторов и для транзисторов логических интегральных схем. В этом случае длительность фронта коллекторного напряжения определяется зарядом емкости C_k и паразитной емкости нагрузки C_n , т.е.

$$t_{\phi}^{01} \approx 2,2 \cdot R_k (C_n + C_k \beta)$$

Быстродействие ключа на БТ.



• Для оценки разрешающего времени используются временные параметры: длительности задержки включения

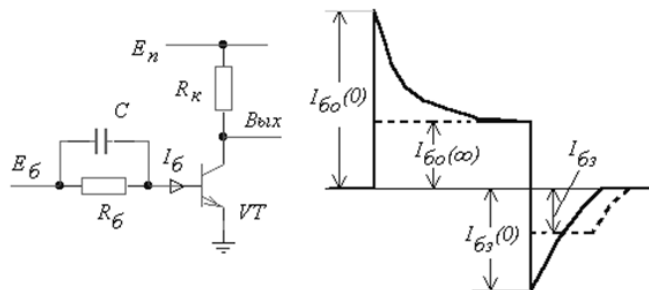
• $t_{з\text{вкл}} = t_з^{10}$ и фронта включения $t_ф^{10}$, длительности задержки

• $t_{з\text{выкл}} = t_з^{01}$ и фронта $t_ф^{01}$ выключения. Часто для характеристики быстродействия логического элемента используется среднее время задержки сигнала при его передаче через элемент:

$$t_{з\text{ср}} = 0,5(t_{з\text{вкл}} + t_{з\text{выкл}})$$

(74)

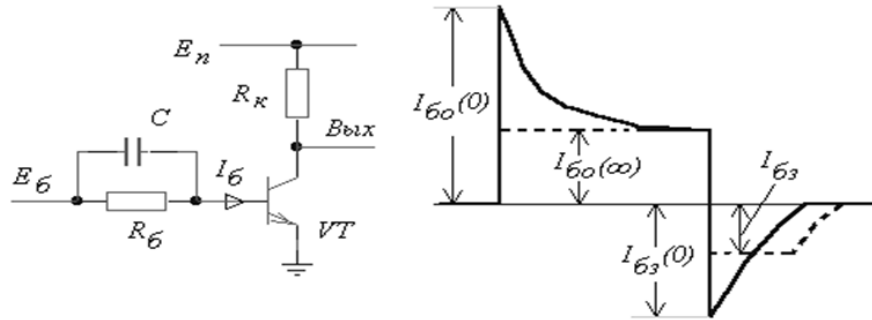
Способы повышения быстродействия ключей на БТ.
Форсирующий конденсатор.



Из-за емкости C при подаче на вход схемы отпирающего сигнала в базовой цепи в первый момент протекает значительный ток. Начальное значение этого тока равно $I_{б0}(0) \approx E_б^1 / r_{ex}$

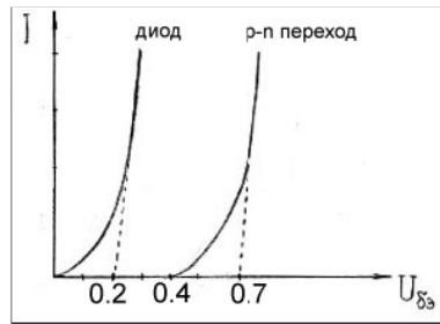
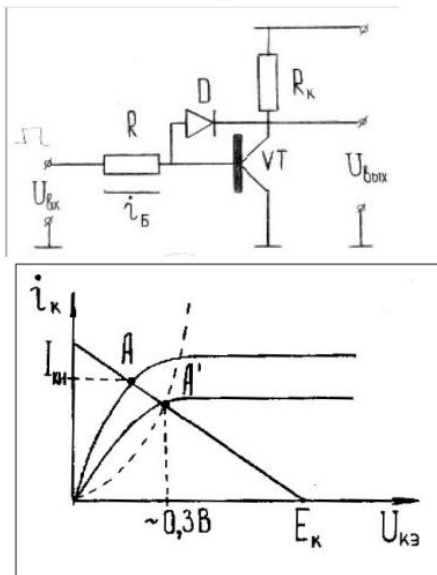
, где r_{ex} - входное сопротивление открывающегося транзистора. По мере заряда конденсатора C ток базы уменьшается и стремится к уровню $I_{б0}(\infty) \approx E_б^1 / (R_1 + r_{ex})$.

**Способы повышения быстродействия ключей на БТ.
Форсирующий конденсатор.**



При подаче запирающего напряжения конденсатор C разряжается и способствует увеличению запирающего тока, и приводит к ускорению процессов рассасывания заряда в базе и сокращению длительности выключения транзистора. Емкость конденсатора C небольшая и составляет десятки или сотни пикофард, чтобы за время действия входного отпирающего импульса конденсатор полностью зарядился.

**Способы повышения быстродействия ключей на БТ.
Применение нелинейной обратной связи.**

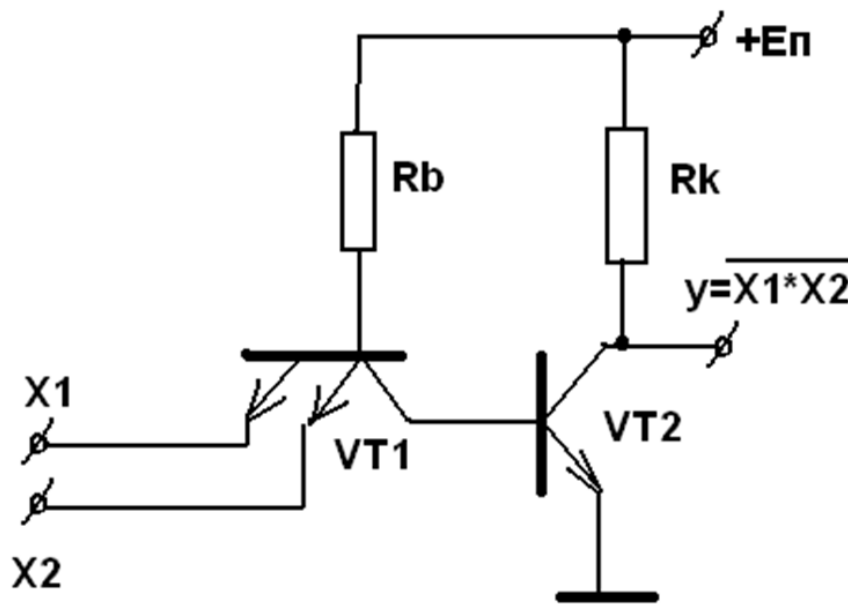


$$\begin{aligned} \Phi_{\text{анода диода}} &= U_{\text{бэ}} \cong 0.7 \\ \Phi_{\text{катода диода}} &= U_{\text{кэ}} \cong E_{\text{к}} \end{aligned} \Rightarrow \text{Диод закрыт. } U_{\text{к}} > U_{\text{а}}$$

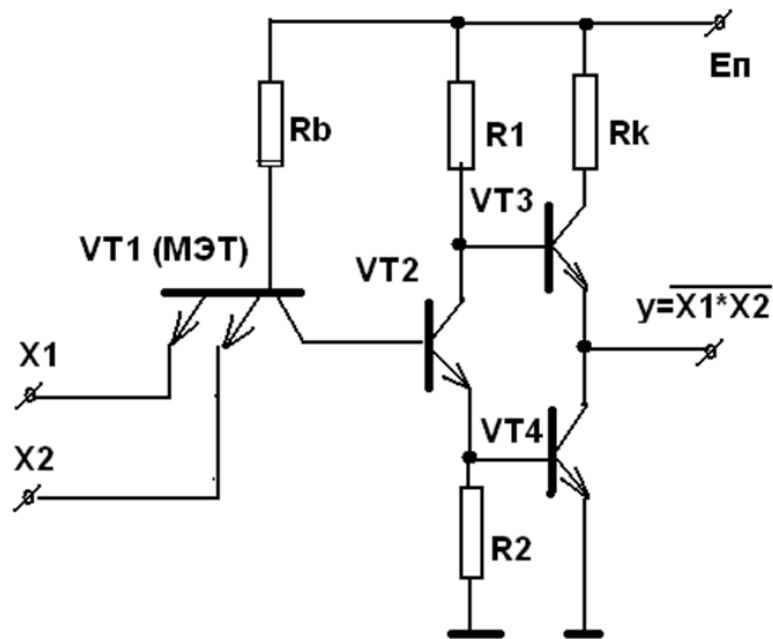
$$\begin{aligned} U_{\text{кэ}} = 0.3 \text{ В} &\Rightarrow \Phi_{\text{к}} = 0.3 \text{ В} \\ \Phi_{\text{а}} &= U_{\text{бэ}} = 0.7 \text{ В} \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \Phi_{\text{а}} - \Phi_{\text{к}} = 0.4 \text{ В} \Rightarrow \text{Диод открыт}$$

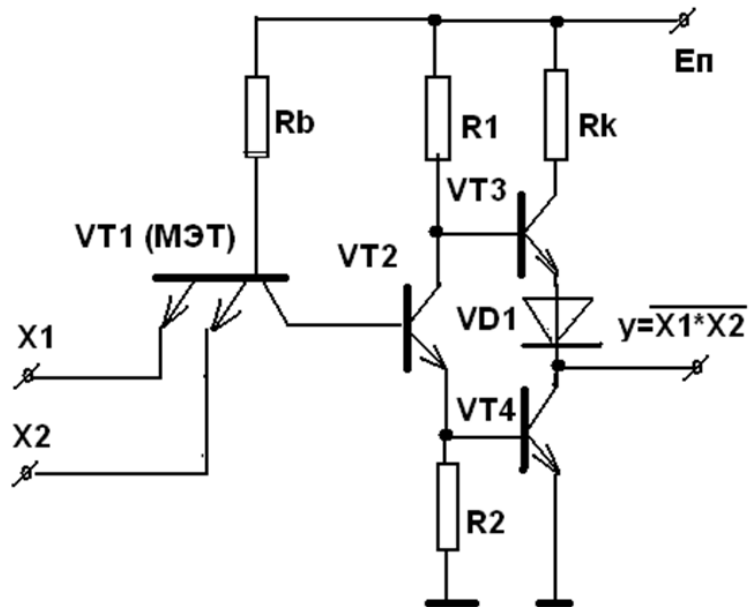
Схемы ТТЛ.



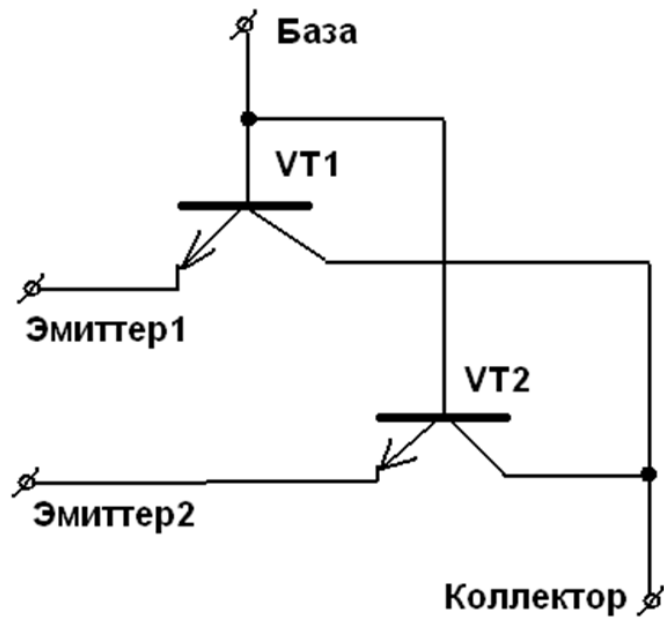
Схемы ТТЛ.



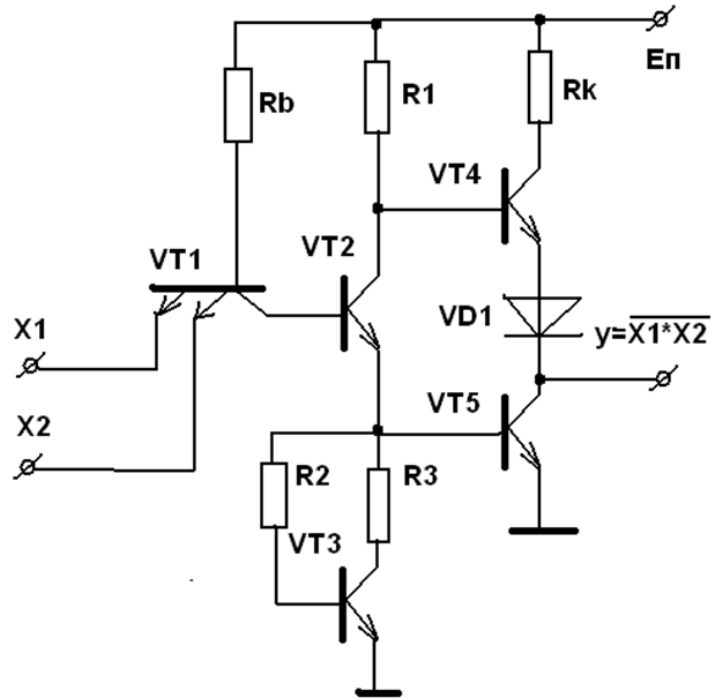
Схемы ТТЛ.



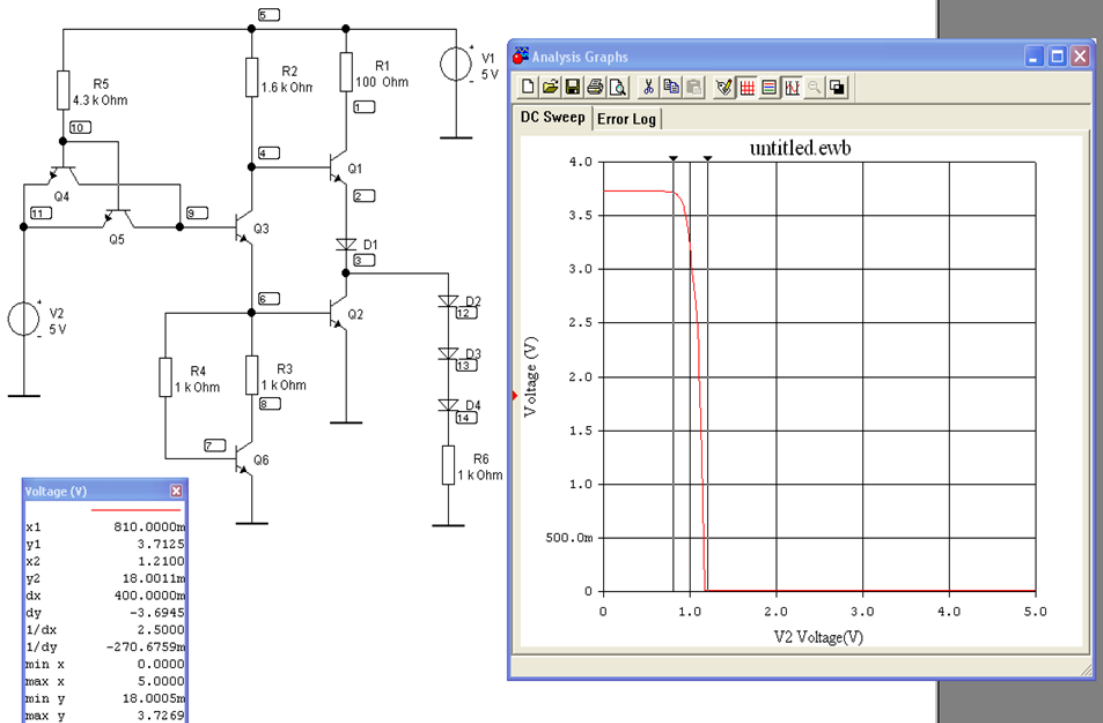
Моделирование МЭТ в EWB.



Схемы ТТЛ.



Передаточная характеристика ТТЛ.



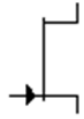
Полевые транзисторы (ПТ). Классификация.



Принцип действия полевых транзисторов.

Полевой транзистор - это полупроводниковый прибор, усилительные свойства которого обусловлены потоком основных носителей, протекающим через проводящий канал и управляемый электрическим полем. В отличие от биполярных, работа полевых транзисторов основана на использовании основных носителей заряда в полупроводнике. Полевой транзистор с управляющим р-п-переходом, смещенным в обратном направлении. Электрод, из которого в канал входят носители заряда, называют истоком; электрод, через который из канала уходят носители заряда, - стоком; электрод, служащий для регулирования поперечного сечения канала, - затвором.

УГО полевых транзисторов с управляющим р-п-переходом.

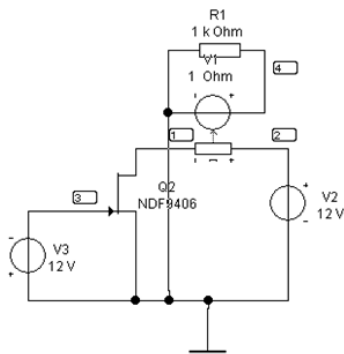


Полевой транзистор с управляющим р-п-переходом и каналом n-типа (JFET)

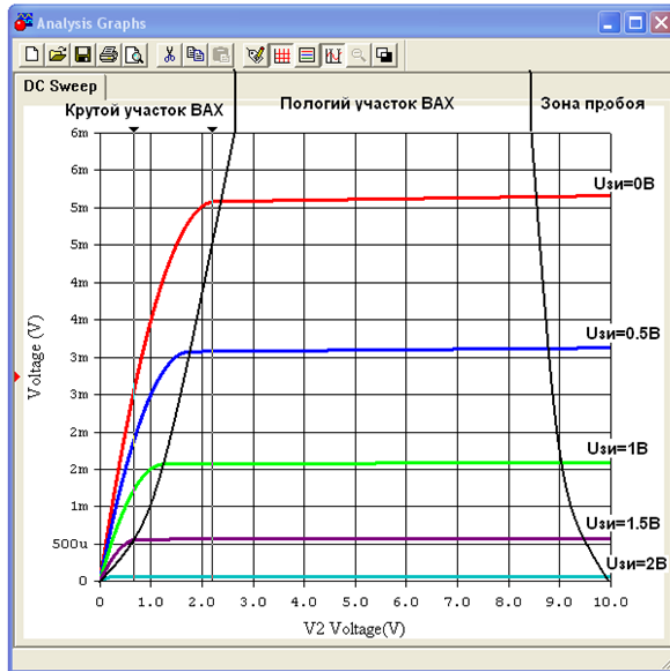


Полевой транзистор с управляющим р-п-переходом и каналом р-типа (JFET).

Выходная ВАХ ПТ.

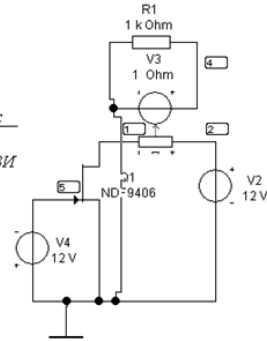


voltage (V)	
x1	668.0000m
y1	2.5537m
x2	2.2030
y2	5.0793m
dx	1.5350
dy	2.5255m
1/dx	651.4658m
1/dy	395.9553
min x	0.0000
max x	10.0000
min y	0.0000
max y	5.1605m



Определение S.

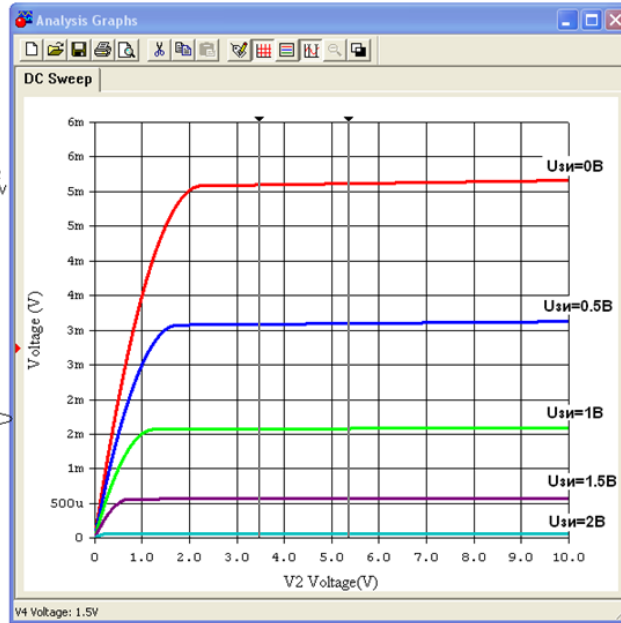
$$S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{3И}}$$



Voltage (V)		Voltage (V)	
x1	3.4750	x1	3.4750
y1	63.1542u	y1	567.8130u
x2	5.3610	x2	5.3610
y2	63.3906u	y2	569.9368u
dx	1.8860	dx	1.8860
dy	236.4591n	dy	2.1238u
1/dx	530.2227m	1/dx	530.2227m
1/dy	4.2291M	1/dy	470.8578K
min x	0.0000	min x	0.0000
max x	10.0000	max x	10.0000
min y	2.0327p	min y	1.5327p
max y	63.9722u	max y	575.1605u

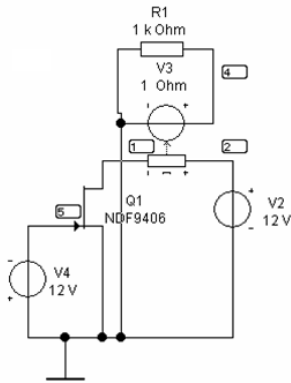
I_c при U_{зи}=2В

I_c при U_{зи}=1.5В

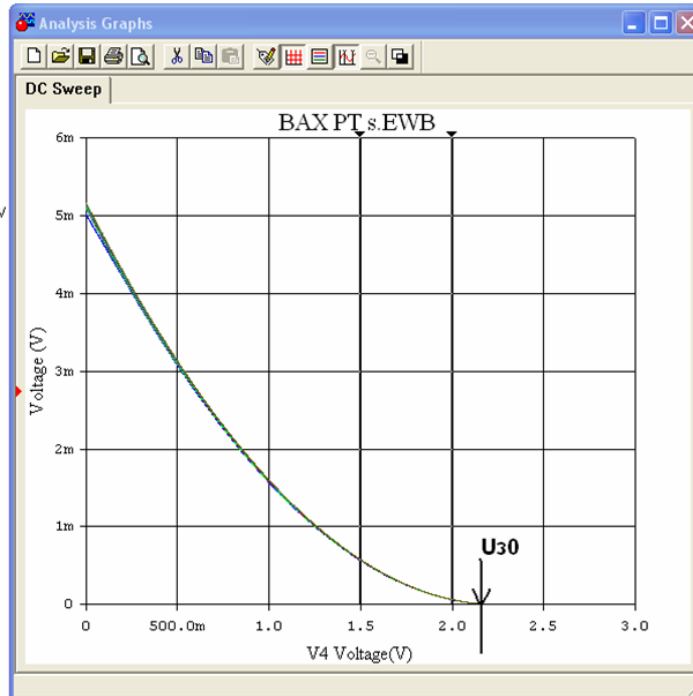


$$S = \frac{0.5678mA - 0.0632mA}{0.5} = 1mA/B$$

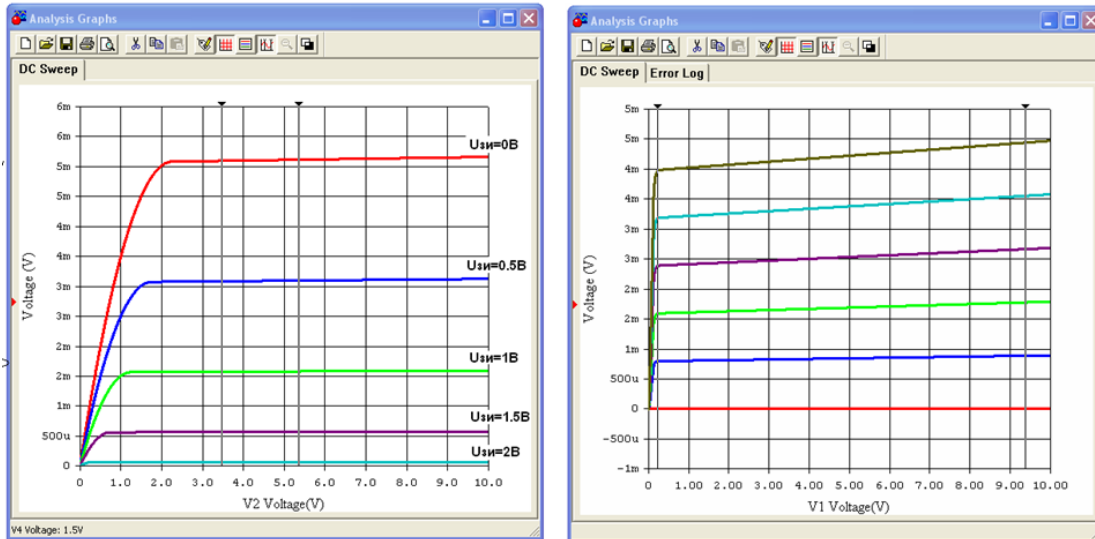
Стоко-затворная характеристика ПТ.



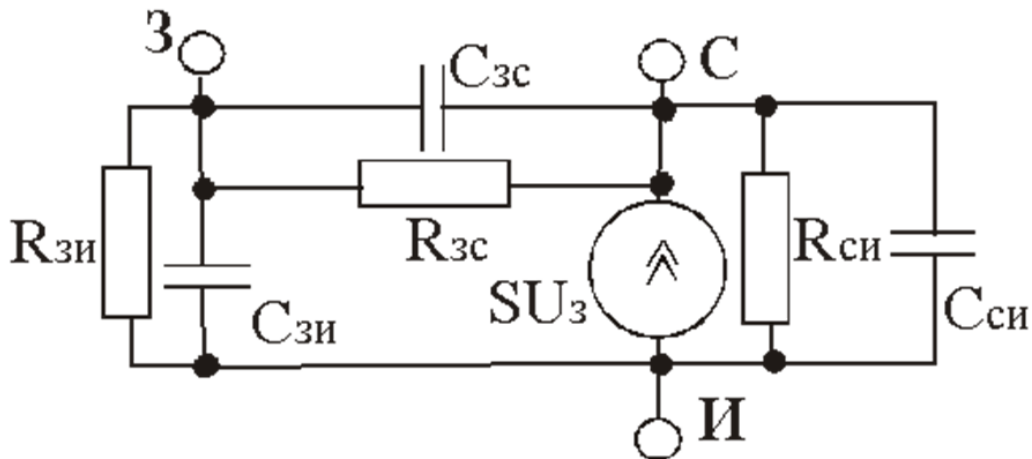
Voltage (V)	
x1	1.4910
y1	589.0364u
x2	1.9930
y2	67.6039u
dx	502.0000m
dy	-521.4325u
1/dx	1.9920
1/dy	-1.9178K
min x	0.0000
max x	3.0000
min y	32.2853p
max y	5.1605m



Выходные ВАХ БТ и ПТ.

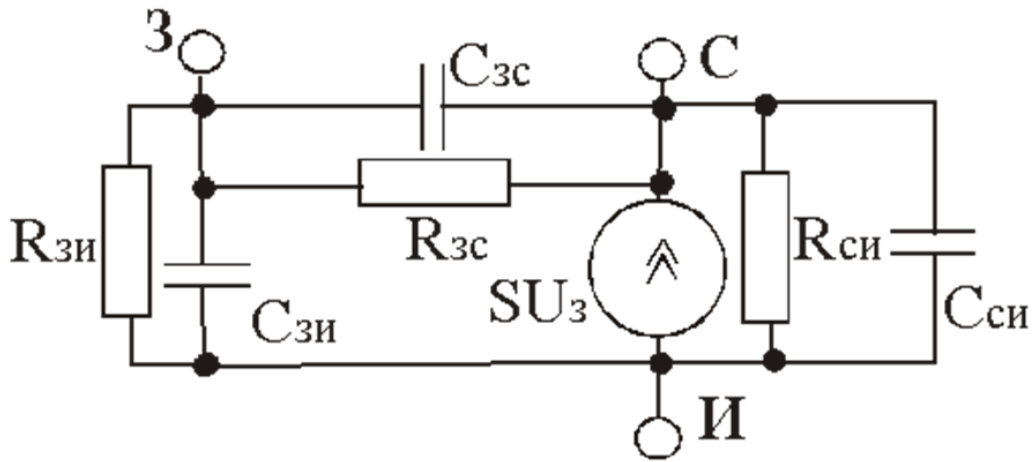


Эквивалентные схемы ПТ.



Частотные и импульсные характеристики транзистора определяются емкостями электродов: затвор - сток $C_{зс}$, затвор - сток $C_{зи}$, сток - исток $C_{си}$. Емкости $C_{зи}$ и $C_{зс}$ зависят от площади затвора и степени легирования канала, емкость $C_{зс}$ - самая маленькая среди рассмотренных.

Эквивалентные схемы ПТ.



Сопротивления утечки $R_{зс}$, $R_{зи}$, $R_{си}$ весьма велики и учитываются, как правило, при расчете электрометрических усилительных каскадов постоянного тока. При расчете импульсных каскадов и усилительных каскадов переменного тока их, как правило, не учитывают, поскольку проводимость емкостей обычно всегда больше шунтирующих их проводимостей утечки электродов.

Статические ВАХ ПТ с управляющим р-п-переходом.

Крутой участок ВАХ ПТ (участок омического сопротивления) описывается аналитическим выражением:

$$I_c = \frac{1}{R_{\min}} \left(U_{си} + \frac{2}{3} \frac{(U_{зи})^3 - (U_{зи} + U_{си})^3}{\sqrt{U_{зи.отс}}} \right)$$

Пологий участок ВАХ ПТ описывается:

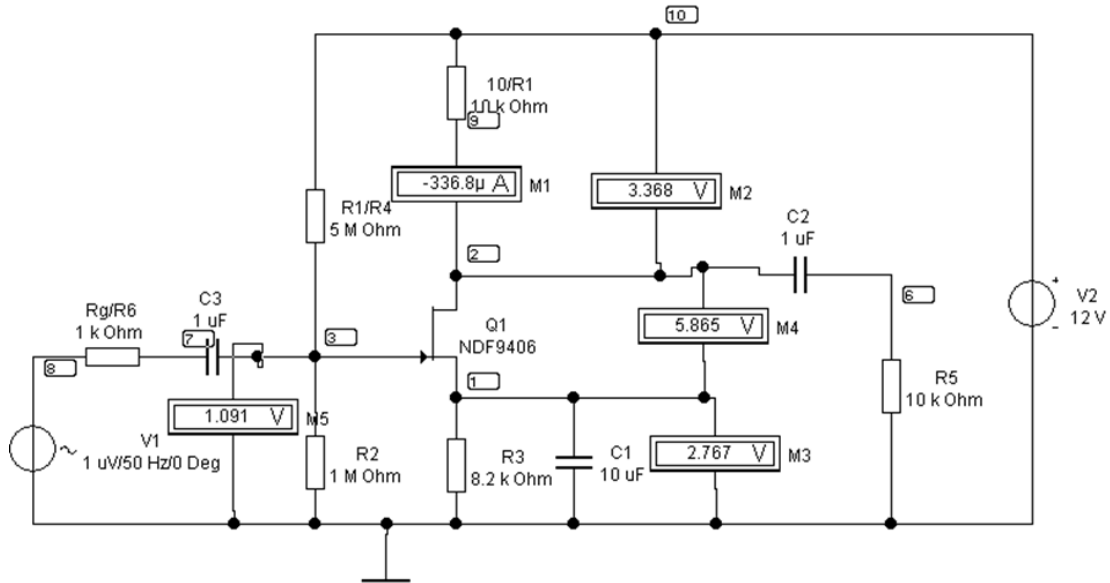
$$I_c = \frac{B}{2} (U_{зи} - U_{зи.отс})^2$$

B – удельная крутизна, зависящая от геометрии структуры ПТ и электрических параметров материала.

$$B = \frac{2I_{c.max}}{U_{зи.отс}^2}$$

$I_{c.max}$ – максимальный ток стока при $U_{зи} = 0$.

Схемы на ПТ.



Схемы на ПТ.

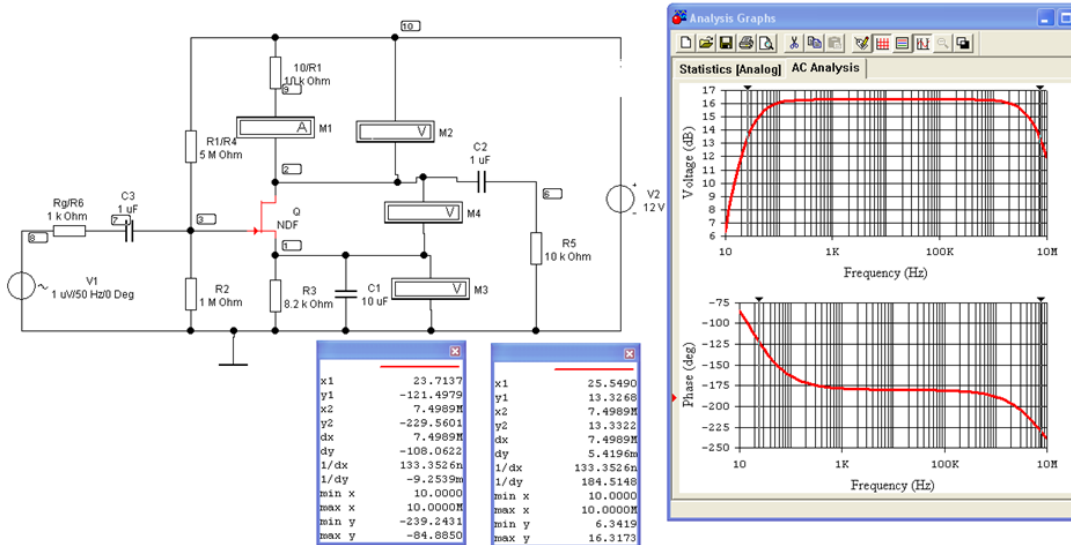
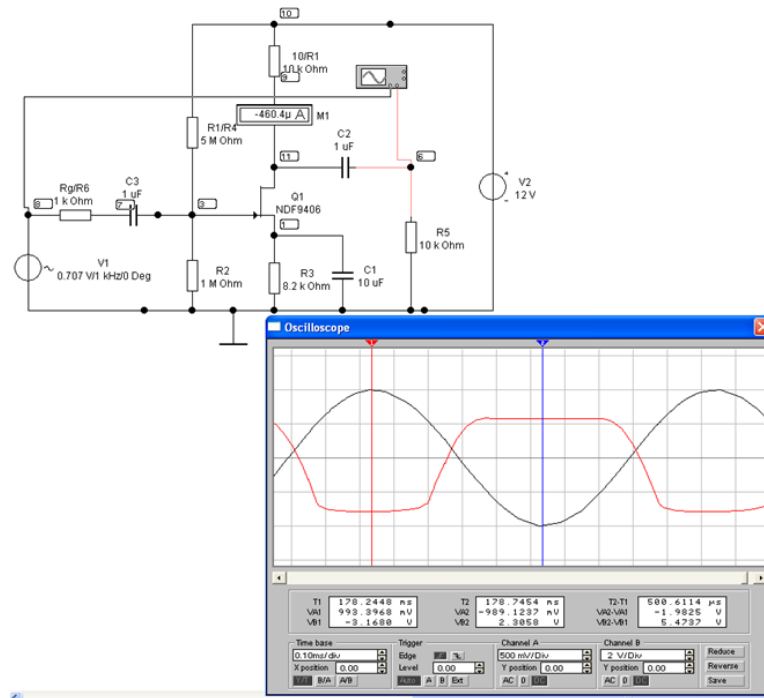
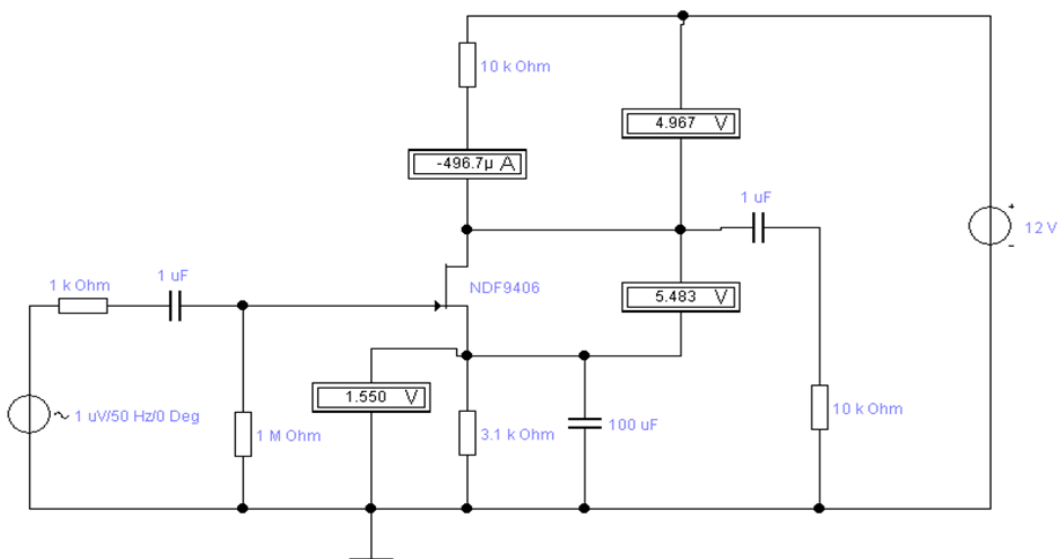


Схема на ПТ.

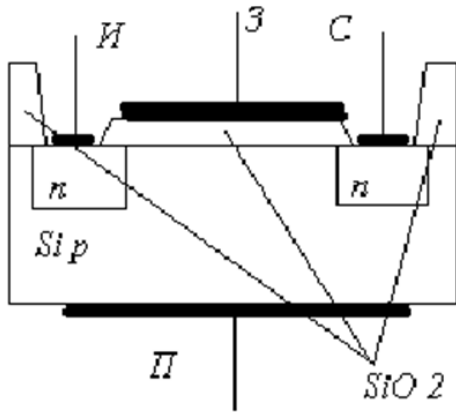


Схемы на ПТ с «автоматическим смещением».

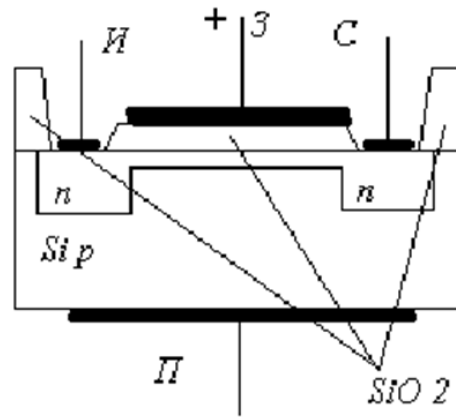


Полевые транзисторы с изолированным затвором.

Индукцированный канал



Встроенный канал



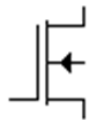
УГО ПТ с изолированным затвором и встроенным каналом (MOSFET).



канал n-типа



канал p-типа



канал n-типа



канал p-типа

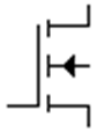
УГО ПТ с изолированным затвором и индуцированным каналом (MOSFET).



канал n-типа



канал p-типа

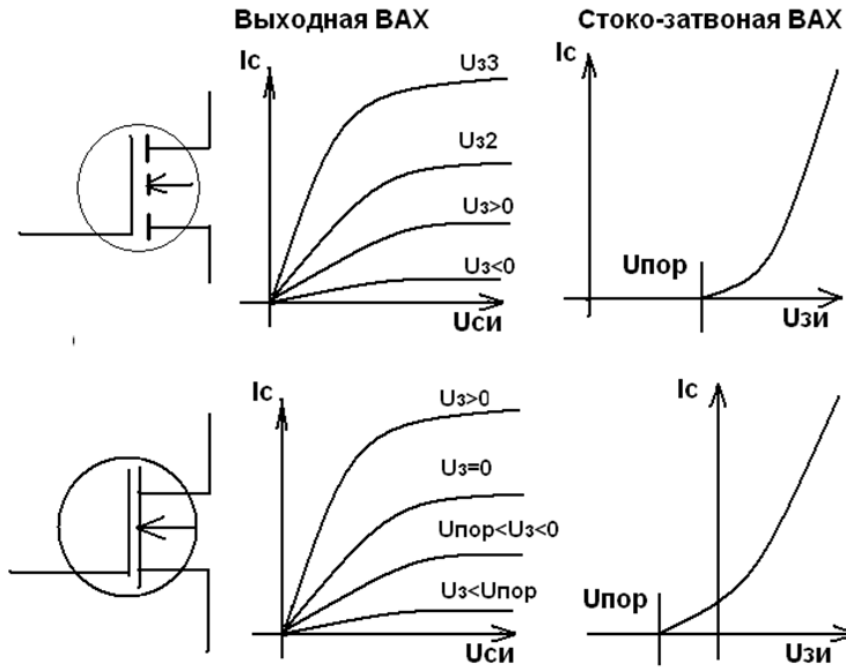


канал n-типа

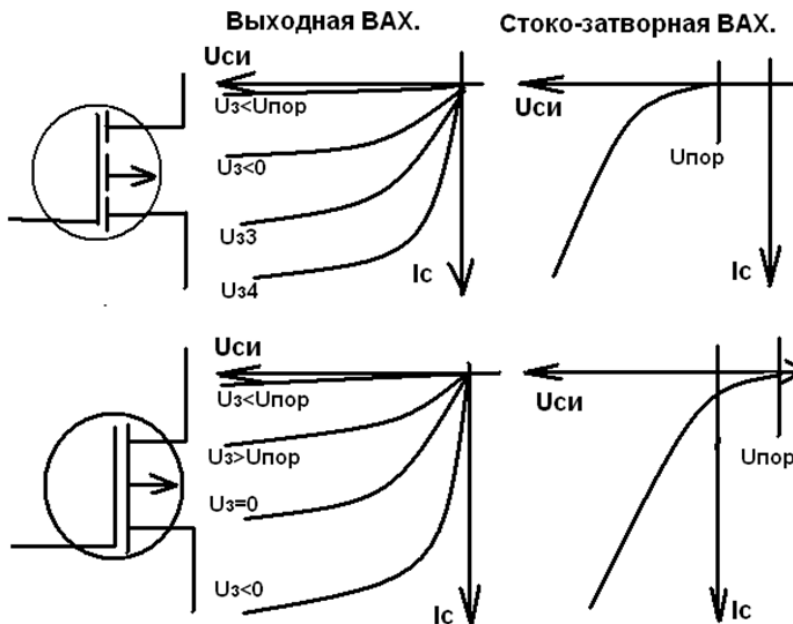


канал p-типа

ВАХ полевых транзисторов с изолированным затвором.



ВАХ полевых транзисторов с изолированным затвором.



Основные параметры полевых транзисторов.

1. Крутизна характеристики

$$S = \frac{\partial I_c}{\partial U_{зи}} \Big|_{U_{си} = const, U_{пи} = const}$$

2. Крутизна характеристики по подложке

$$S_{п} = \frac{\partial I_c}{\partial U_{пи}} \Big|_{U_{си} = const, U_{зи} = const}$$

3. Начальный ток стока $I_{с.нач}$ - ток стока при нулевом напряжении $U_{зи}$.

4. Напряжение отсечки $U_{зи.отс}$ - напряжение между затвором и истоком, при котором ток стока достигает низкого значения ($I_c \rightarrow 0$), называют напряжением отсечки.

5. Пороговое напряжение $U_{зи.пор}$. Напряжение на затворе, при котором индуцируется канал, называется пороговым напряжением. Для исключения неоднозначности в определении $U_{зи.пор}$ задается определенное значение тока стока, при превышении которого считается, что потенциал затвора достиг порогового напряжения $U_{зи.пор}$.

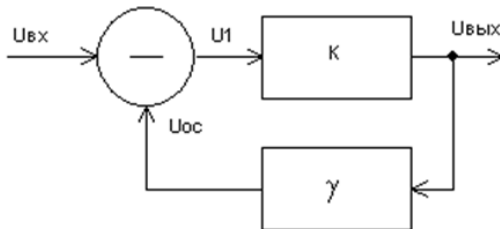
6. Сопротивление участка сток-исток в открытом состоянии $R_{си.откр}$.

7. Постоянный ток стока $I_{с.нач}$.

8. Остаточный ток стока $I_{с.ост}$ - ток стока при напряжении $U_{зи.отс}$.

9. Максимальная частота усиления f_r - частота, на которой коэффициент усиления по мощности K_p равен единице.

Обратная связь (ОС) в усилителях.



Обратной связью называется явление подачи части выходного напряжения усилителя на его вход. В общем виде структурная схема усилителя с обратной связью представлена слева. Напряжение с выхода усилителя, имеющего коэффициент усиления K , подается на вход звена обратной связи с коэффициентом передачи γ . Выходное напряжение звена обратной связи, равное:

$$U_{ос} = U_{вых} \cdot \gamma$$

Классификация ОС.



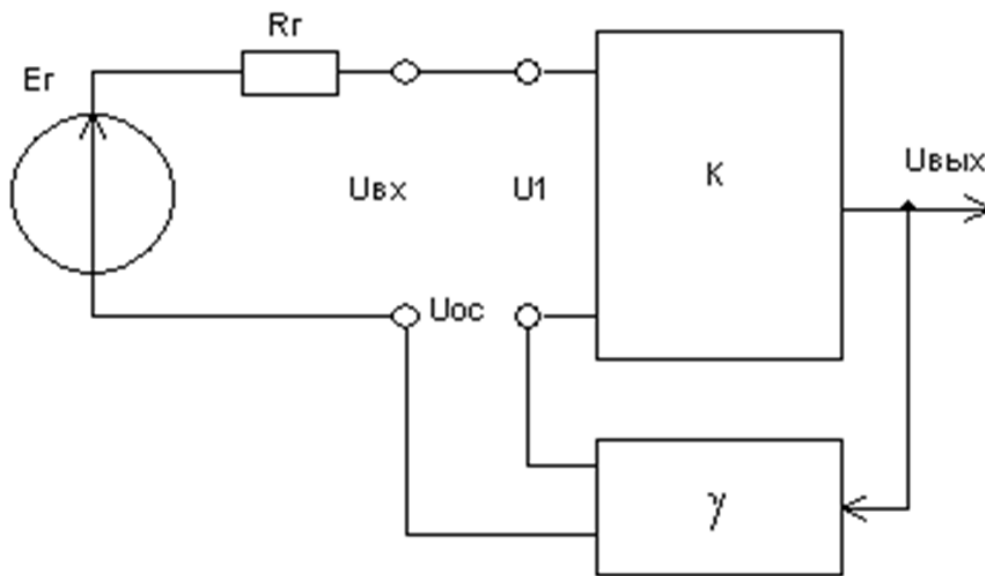
ОС.

Петлей обратной связи называют замкнутый контур, включающие в себя цепь ОС и часть усилительного каскада между точками ее подключения.

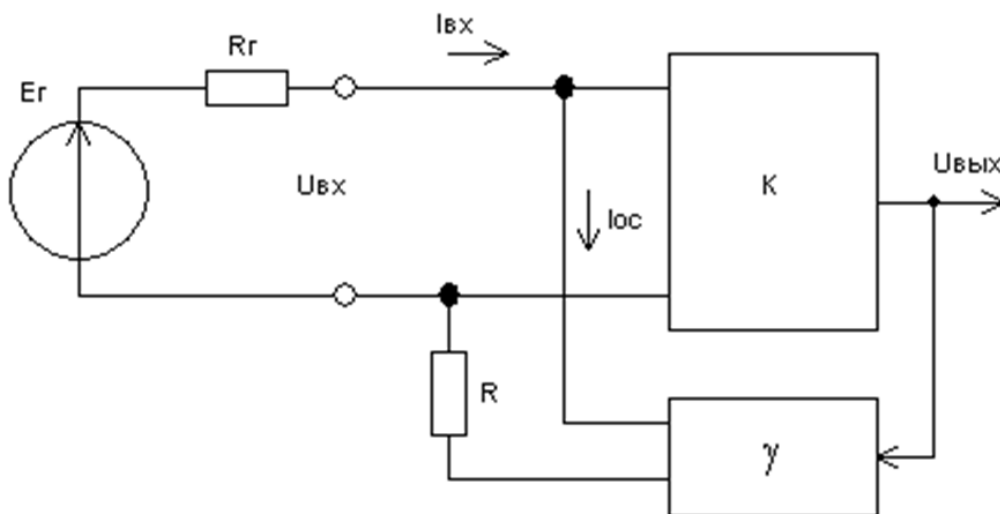
Местной обратной связью (местной петлей ОС) называют ОС, охватывающую отдельно взятый усилительный каскад многокаскадного усилителя.

Общая обратная связь это такая ОС, которая охватывает весь усилитель.

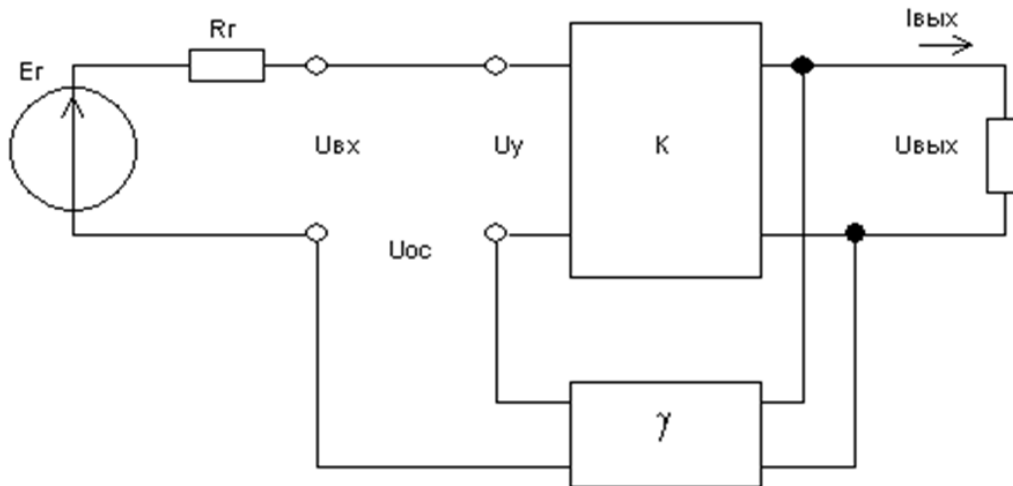
Последовательная ОС.



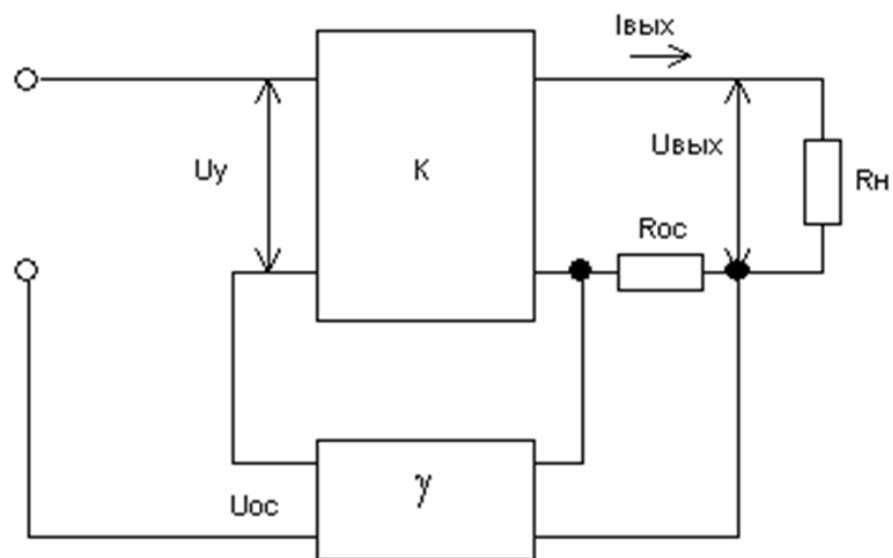
Параллельная ОС.



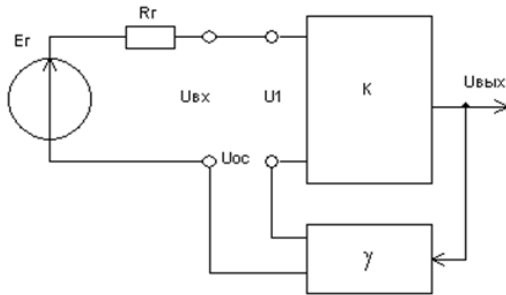
Отрицательная ОС (ООС) по напряжению.



ОС по току.



ОС.

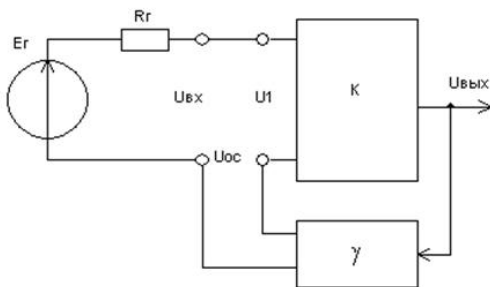


Обратной связью называется явление подачи части выходного напряжения усилителя на его вход. В общем виде структурная схема усилителя с обратной связью представлена слева. Напряжение с выхода усилителя, имеющего коэффициент усиления K , подается на вход звена обратной связи с коэффициентом передачи γ . Выходное напряжение звена обратной связи, равно:

$$U_{ос} = U_{вых} \cdot \gamma$$

ОС.

$$U_{ос} = U_{вых} \cdot \gamma$$



подается на вход усилителя, где алгебраически суммируется с входным напряжением. В результате реальное напряжение на входе усилителя составляет величину:

$$U_1 = U_{вх} \pm U_{ос}$$

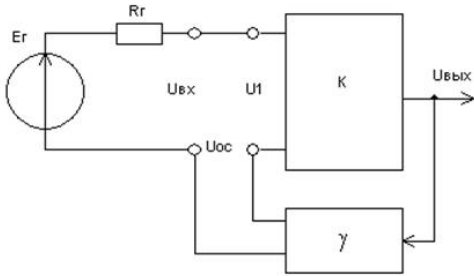
Если принять коэффициенты K и γ чисто активными, можно записать:

$$U_{вых} = U_1 \cdot K$$

ОС.

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_1 \cdot K_1$$

Подставляя в данное выражение значение U_1 и $U_{\text{ОС}}$ можно получить:



$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}} \cdot K \pm K \cdot \gamma \cdot U_{\text{ВЫХ}}$$

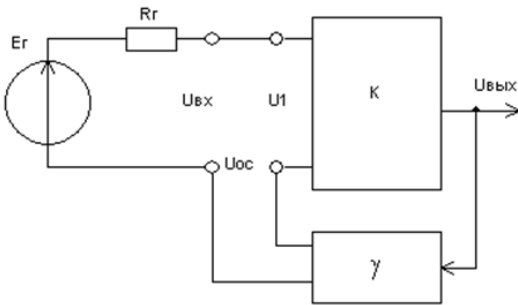
$$U_{\text{ВЫХ}} (1 \mp K \cdot \gamma) = U_{\text{ВХ}} \cdot K$$

Отсюда коэффициент усиления усилителя, охваченного обратной связью:

$$K_{\text{С}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{K}{1 \mp K \cdot \gamma}$$

ОС.

Выражение в знаменателе " $1 \pm K \cdot \gamma$ " называется глубиной обратной связи и показывает во сколько раз изменяется коэффициент усиления под влиянием ОС.

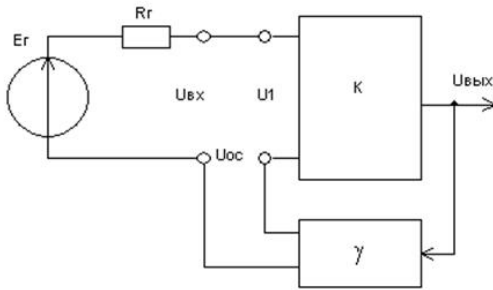


Знак "+" соответствует отрицательной обратной связи (ООС), которая уменьшает коэффициент усиления усилителя. Особенностью ООС является то, что при больших K значение $K \cdot \gamma \gg 1$ и выражение для коэффициента усиления усилителя, охваченного отрицательной обратной связью принимает вид:

$$K_{\text{С}} \approx \frac{1}{\gamma}$$

т.е. определяется только свойствами звена обратной связи. Это свойство обратной связи часто используется в многочисленных схемах аналоговой электроники.

ОС.



Знак " - " указывает на наличие в усилителе положительной обратной связи (ПОС). Нетрудно увидеть, что при этом происходит увеличение коэффициента усиления. Однако ПОС может вызвать ряд явлений, существенно искажающих режим работы усилителя. Если $K\gamma \rightarrow 1$, $(1-K\gamma) \rightarrow 0$, откуда следует, что коэффициент усиления неограниченно возрастает ($K \rightarrow \infty$) и усилитель входит в режим самовозбуждения.

Все обратные связи можно подразделяются по способу съема сигнала обратной связи на выходе усилителя и по способу введения сигнала на входе. На рис. 1.5 показана последовательная обратная связь, когда сигнал напряжение обратной связи подается на вход последовательно со входным напряжением.

ОС.

Оценка стабильность коэффициента усиления усилителя с ООС. Для этого продифференцируем

$$K_c = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{K}{1 \mp K \cdot \gamma}$$

Получим:

$$dK_{\text{УОС}} = \frac{dK_{\text{У}}(1+K_{\text{У}}\gamma) - dK_{\text{У}}K_{\text{У}}\gamma}{(1+K_{\text{У}}\gamma)^2} = \frac{dK_{\text{У}}}{(1+K_{\text{У}}\gamma)^2}$$

Умножим правую и левую части этого уравнения на $K_{\text{У}}$, учтем:

$$K_c = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{K}{1 \mp K \cdot \gamma}$$

И получаем выражение для относительного изменения коэффициента усиления:

$$\frac{dK_{\text{УОС}}}{K_{\text{УОС}}} = \frac{dK_{\text{У}}/K_{\text{У}}}{1+K_{\text{У}}\gamma}$$

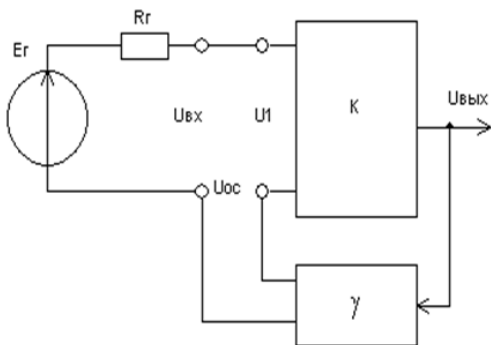
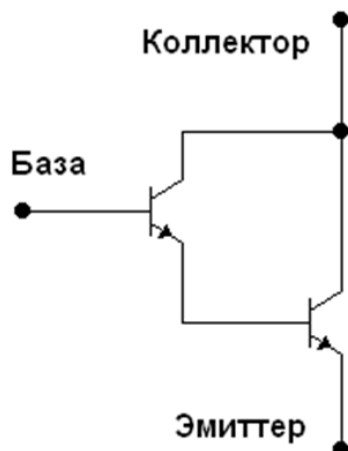


Схема Дарлингтона.

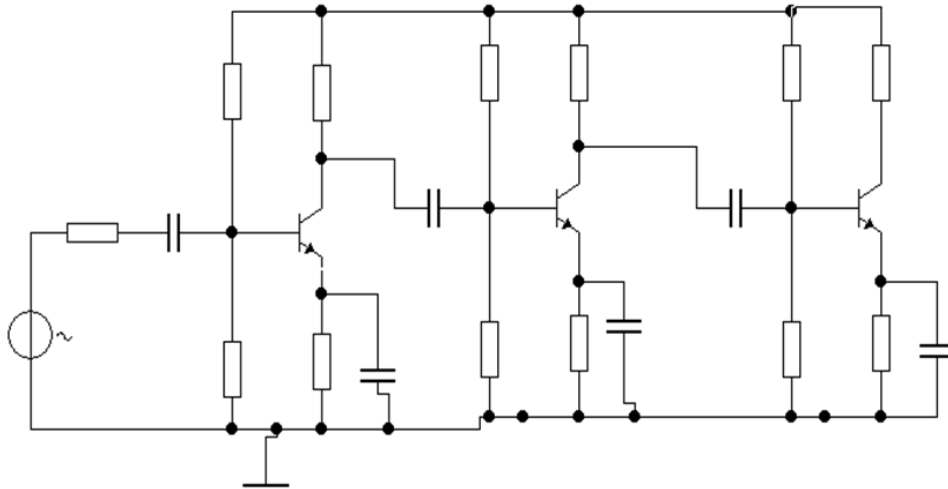


Составной транзистор (схема Дарлингтона).

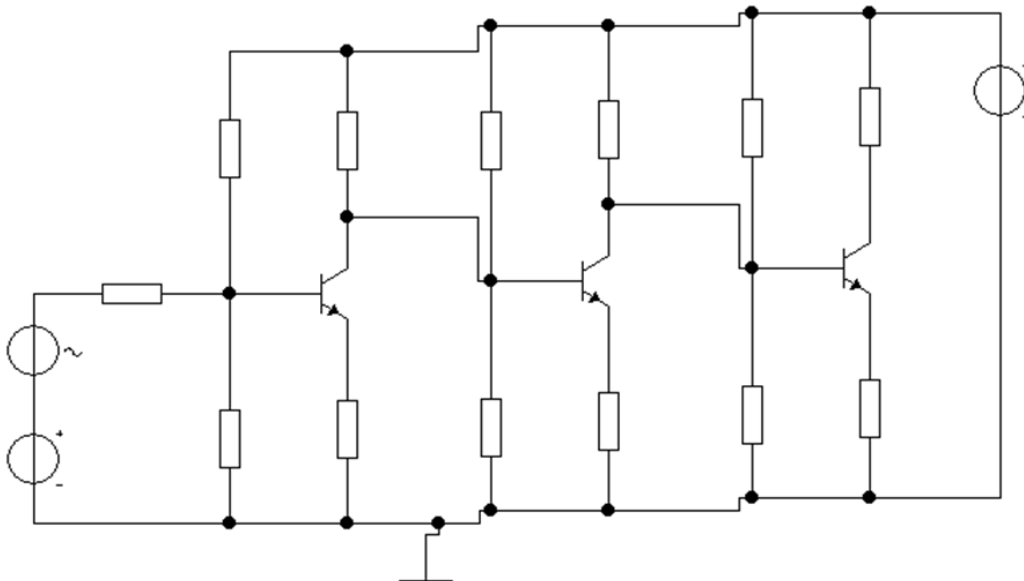
Многокаскадные усилители.



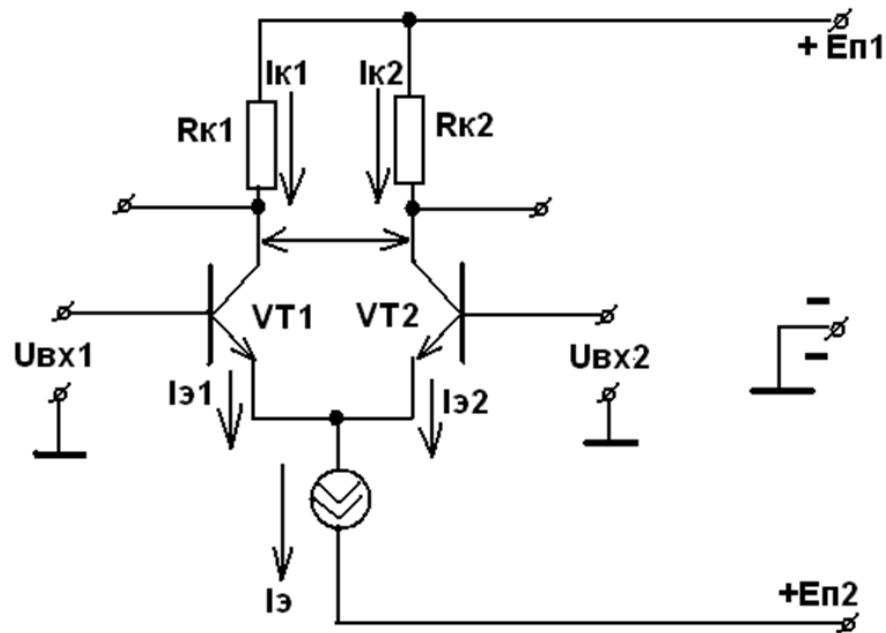
Схема многокаскадного усилителя с конденсаторной связью.



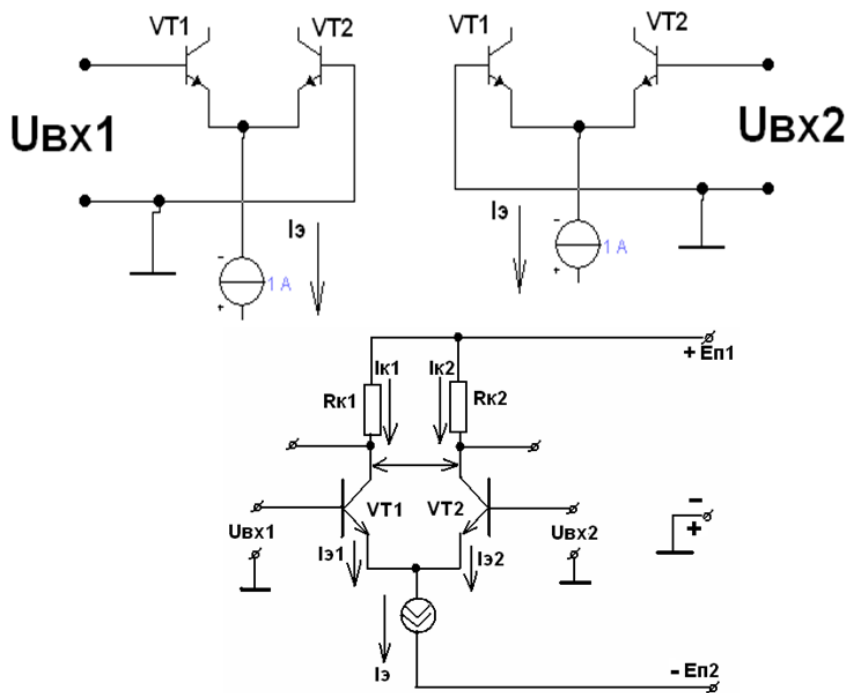
УПТ.



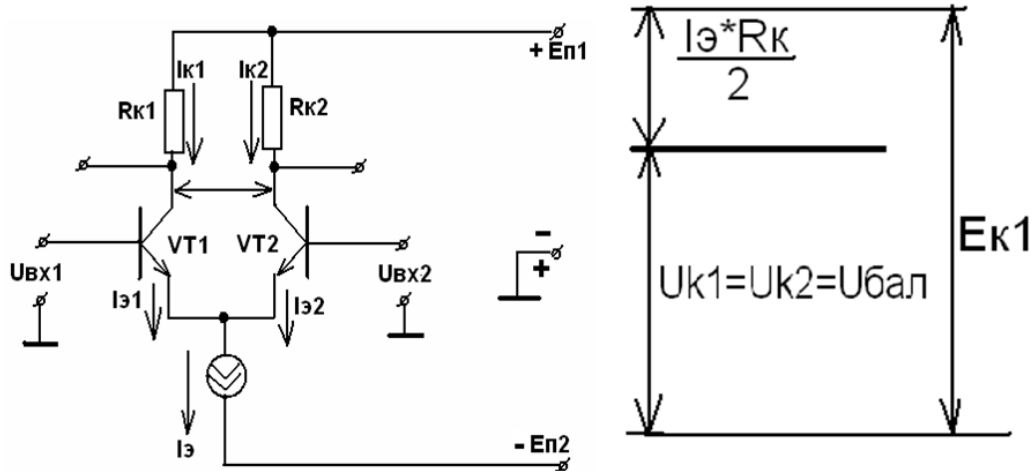
Дифференциальный усилительный каскад.



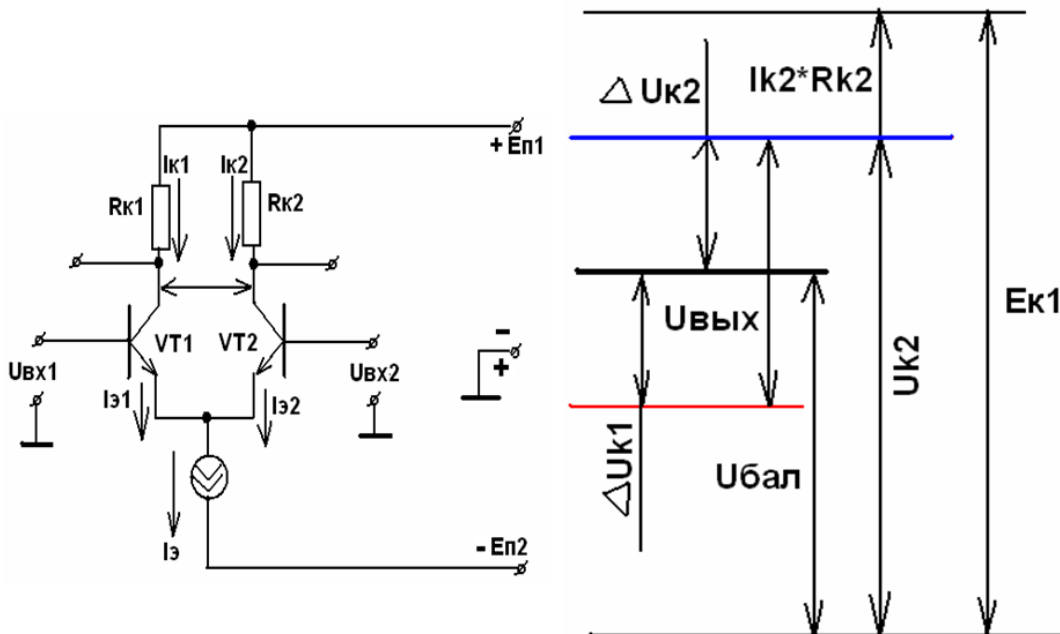
Дифференциальный усилительный каскад.



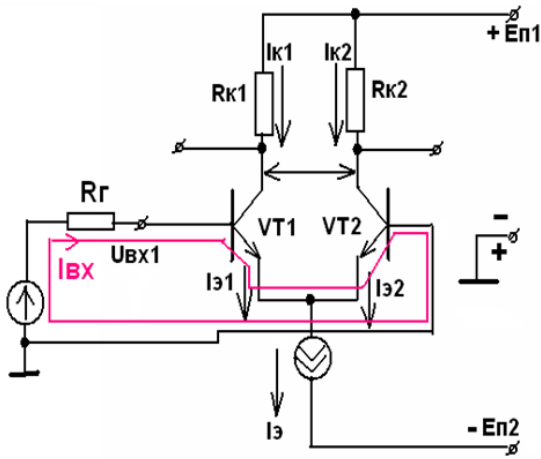
**Дифференциальный усилительный каскад.
Потенциальная диаграмма при нулевом входном сигнале.**



**Дифференциальный усилительный каскад.
Потенциальная диаграмма при наличии входного сигнала.**



Дифференциальный усилительный каскад.



$$I_{\text{вх}} = \frac{E_r}{R_r + r_{\text{вх1}} + r_{\text{вх2}}} = \frac{E_r}{R_r + 2r_{\text{вх}}} = \frac{V_r}{R_r + 2[r_s + (1 + \beta)r_3]}$$

Входной ток создает приращение коллекторных токов $\pm \Delta I_K = \pm \beta I_{\text{вх}}$ и напряжений на коллекторах:

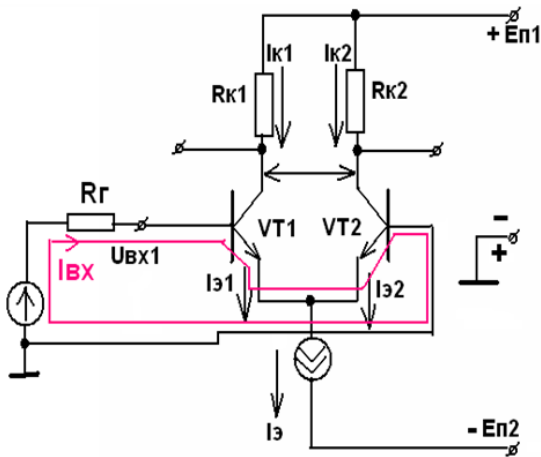
$$\pm \Delta U_{\text{вхк}} = \pm \Delta I_K R_K = \pm \beta I_{\text{вх}} R_K$$

$$K_{V1-2} = \frac{\Delta U_{\text{вхк}1-2}}{E_r} = \frac{\beta R_K}{R_r + 2R_{\text{вх}}} = \frac{\beta R_K}{R_r + 2[r_s + (1 + \beta)r_3]}$$

При $R_r = 0$:

$$K_{V1-2} = \frac{\beta R_K}{2r_{\text{вх}}} = \frac{\beta R_K}{2[r_s + (1 + \beta)r_3]}$$

Дифференциальный усилительный каскад.



$$K_{\text{вд}} = \frac{2\Delta U_{\text{вхк}1,2}}{E_r} = \frac{2\beta R_K}{R_r + 2r_{\text{вх}}} = \frac{2\beta R_K}{R_r + 2[r_s + (1 + \beta)r_3]}$$

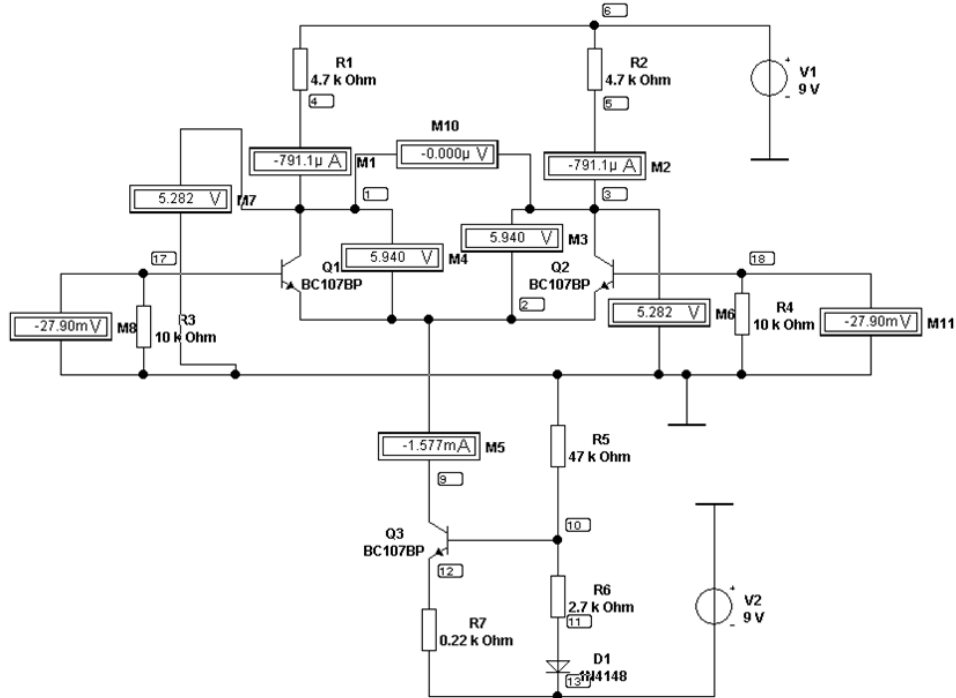
При наличии R_H :

$$K_{\text{вд}} = \frac{\beta(2R_H \parallel R_K)}{R_r + 2r_{\text{вх}}}$$

При $R_H = \infty$ и $R_r = 0$:

$$K_{\text{вд}} = \frac{\beta R_K}{r_{\text{вх}}} = \frac{\beta R_K}{r_s + (1 + \beta)r_3}$$

Дифференциальный усилительный каскад.



Операционный усилитель (ОУ, OpAmp).

ОУ— усилитель постоянного тока с дифференциальным входом и, обычно, единственным выходом, имеющий высокий коэффициент усиления. Как правило, ОУ используются в схемах с глубокой отрицательной обратной связью, которая, благодаря высокому коэффициенту усиления ОУ, полностью определяет коэффициент передачи полученной схемы.

ОУ.

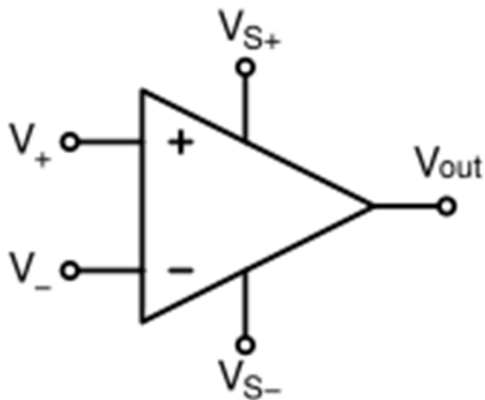


В настоящее время ОУ получили широкое применение как в виде отдельных чипов, так и в виде функциональных блоков в составе более сложных интегральных схем. Такая популярность обусловлена тем, что ОУ является универсальным блоком с характеристиками, близкими к идеальным, на основе которого можно построить множество различных электронных узлов.

ОУ.

Операционный усилитель изначально был спроектирован для выполнения математических операций (отсюда его название), путем использования напряжения как аналоговой величины. Такой подход лежит в основе аналоговых компьютеров, в которых ОУ использовались для моделирования базовых математических операций (сложение, вычитание, интегрирование, дифференцирование и т.д.).

УГО ОУ.



- V_+ : неинвертирующий вход
- V_- : инвертирующий вход
- V_{out} : выход
- V_{S+} : плюс источника питания (также может обозначаться как V_{DD} , V_{CC} , или V_{CC+})
- V_{S-} : минус источника питания (также может обозначаться как V_{SS} , V_{EE} , или V_{CC-})

Параметры идеального ОУ.

- Бесконечно большой коэффициент усиления с разомкнутой петлей обратной связи $G_{openloop}$.[\[2\]](#)
- Бесконечно большое входное сопротивление входов V_- и V_+ . Другими словами, ток, протекающий через эти входы, равен нулю.
- Нулевое выходное сопротивление выхода ОУ.
- Бесконечно большая скорость нарастания напряжения на выходе ОУ.
- Полоса пропускания: от постоянного тока до бесконечности.

Классификация ОУ .

- **По типу элементной базы**
- На биполярных транзисторах
- На полевых транзисторах

Классификация по области применения.

- Индустриальный стандарт. Так называют широко применяемые, очень дешевые ОУ общего применения со средними характеристиками. Пример: *LM324*.
- Прецизионные ОУ имеют очень малые напряжения смещения, применяются в точных измерительных схемах. Обычно ОУ на биполярных транзисторах по этому показателю несколько лучше, чем на полевых. Также от прецизионных ОУ требуется долговременная стабильность параметров. Исключительно малыми смещениями обладают стабилизированные прерыванием ОУ. Пример: *AD707* с напряжением смещения 15 мкВ.

Классификация по области применения.

- С малым входным током (электрометрические) ОУ. Все ОУ, имеющие полевые транзисторы на входе, обладают малым входным током. Но среди них существуют специальные ОУ с исключительно малым входным током. Чтобы полностью реализовать их преимущества, при проектировании устройств с их использованием необходимо даже учитывать утечку тока по печатной плате. Пример: *AD549* с входным током $6 \cdot 10^{-14}$ А.

Классификация по области применения.

- Микромощные и программируемые ОУ потребляют малый ток на собственное питание. Такие ОУ не могут быть быстродействующими, так как малый потребляемый ток и высокое быстродействие — взаимоисключающие требования. Программируемыми называются ОУ, для которых все внутренние токи покоя можно задать с помощью внешнего тока, подаваемого на специальный вывод ОУ.

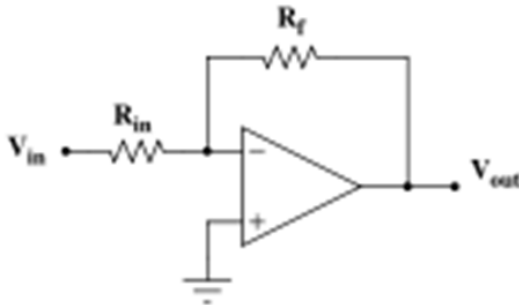
Классификация по области применения.

- **Мощные (сильноточные) ОУ** могут отдавать большой ток в нагрузку.
- **Высоковольтные ОУ**. Все напряжения для них (питания, синфазное входное, максимальное выходное) значительно больше, чем для ОУ широкого применения.
- **Быстродействующие ОУ** имеют высокую скорость нарастания и частоту единичного усиления. Такие ОУ не могут быть микромощными

Передаточная характеристика ОУ.



Инвертирующий усилитель (Inverting amplifier).

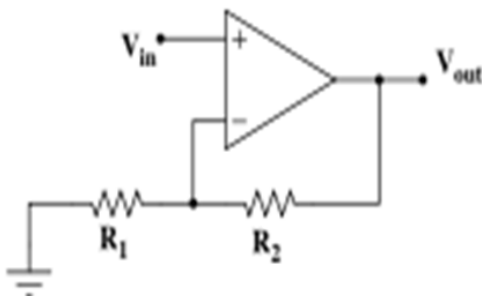


- Инвертирует и усиливает напряжение (то есть умножает напряжение на отрицательную константу)

$$V_{out} = -V_{in} (R_f / R_{in})$$

- $Z_{in} = R_{in}$ (Поскольку V_- является [виртуальной землей](#))
- Третий резистор с сопротивлением, равным (сопротивление параллельно соединенных резисторов R_f и R_{in}), устанавливаемый (при необходимости) между неинвертирующим входом и землей, уменьшает ошибку, возникающую из-за тока

Неинвертирующий усилитель (Non-inverting amplifier).

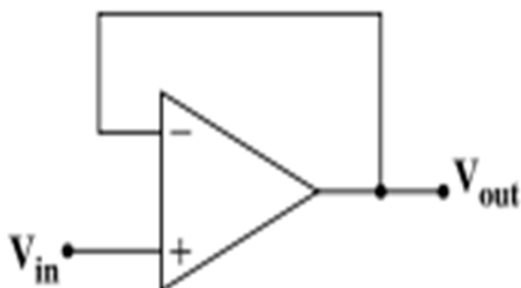


Усиливает
напряжение (умножает
напряжение на
константу, большую
единицы)

$$V_{out} = V_{in} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

$Z_{in} = \infty$ (практически
входное сопротивление
операционного
усилителя, от 1 [МОм](#) до
10 [ТОм](#))

Повторитель напряжения (Voltage follower).

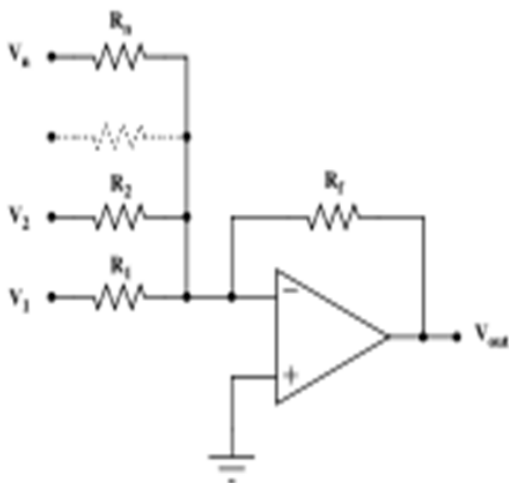


Используется как буферный усилитель, для исключения влияния низкоомной нагрузки на источник с высоким выходным сопротивлением

$$V_{out} = V_{in}$$

$Z_{in} = \infty$ (практически входное сопротивление операционного усилителя, от 1 МОм до 10 ТОм)

Суммирующий усилитель(сумматор) Summing amplifier.

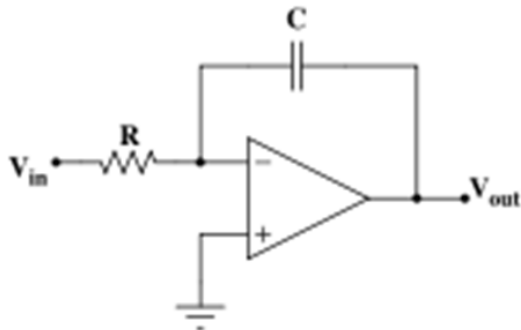


- Суммирует (с весом) несколько напряжений. Сумма на выходе инвертирована, то есть все веса отрицательны.

$$V_{out} = -R_f \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \dots + \frac{V_n}{R_n} \right)$$

- Если $R_1 = R_2 = \dots = R_n$, то
$$V_{out} = - \left(\frac{R_f}{R_1} \right) (V_1 + V_2 + \dots + V_n)$$
- Если $R_1 = R_2 = \dots = R_n = R_f$, то
$$V_{out} = -(V_1 + V_2 + \dots + V_n)$$
-
- Выход инвертирован
- Входной импеданс n -го входа равен $Z_n = R_n$.

Интегратор Integrating amplifier.

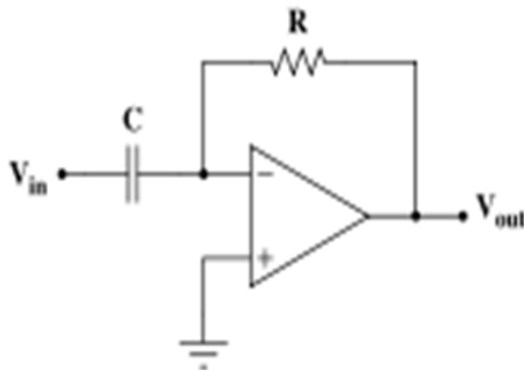


$$V_{out} = \int_0^t -\frac{V_{in}}{RC} dt + V_{initial}$$

где V_{in} и V_{out} — функции времени, $V_{initial}$ — выходное напряжение интегратора в момент времени $t = 0$.

Данный четырехполюсник можно также рассматривать как [фильтр](#).

Дифференциатор differentiating amplifier.



[Дифференцирует](#) (инвертированный) входной сигнал по времени.

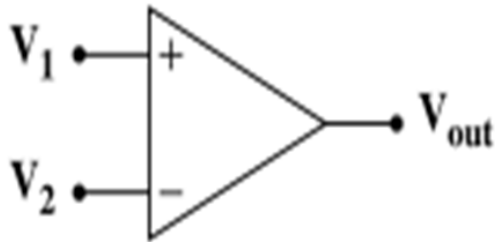
Не следует путать название "дифференциатор" и "[дифференциальный усилитель](#)",

$$V_{out} = -RC \left(\frac{dV_{in}}{dt} \right)$$

где V_{in} и V_{out} — функции времени.

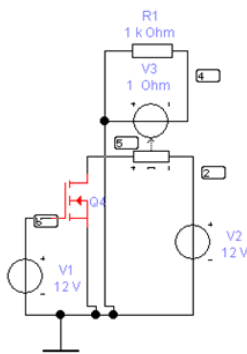
Данный четырехполюсник можно также рассматривать как [фильтр](#).

Компаратор. Comparator.

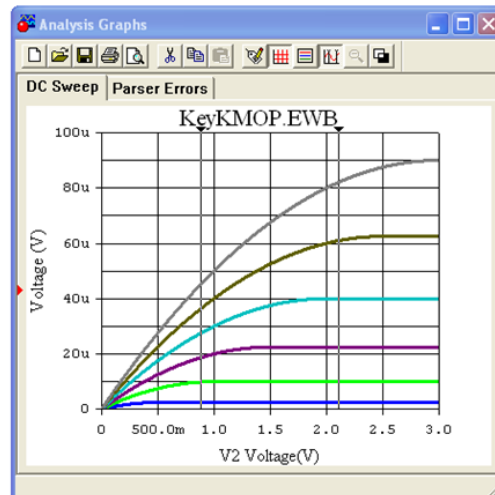


Сравнивает два напряжения и выдает на выходе одно из двух состояний в зависимости от того, какое из входных напряжений больше.

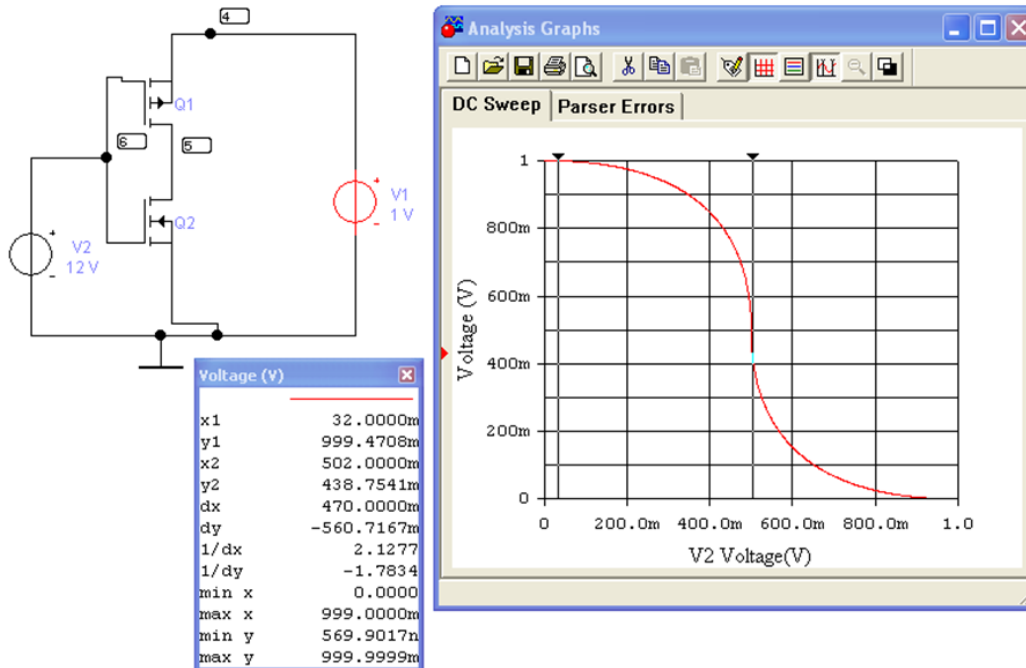
$$V_{out} = \begin{cases} V_{S+} & V_1 > V_2 \\ V_{S-} & V_1 < V_2 \end{cases}$$



Voltage (V)	
x1	887.0000m
y1	2.1169p
x2	2.1120
y2	5.0406p
dx	1.2250
dy	2.9236p
1/dx	816.3265m
1/dy	342.0408G
min x	0.0000
max x	3.0000
min y	0.0000
max y	7.1599p



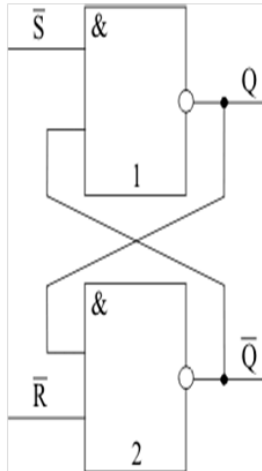
Инвертор КМОП.



Триггеры.

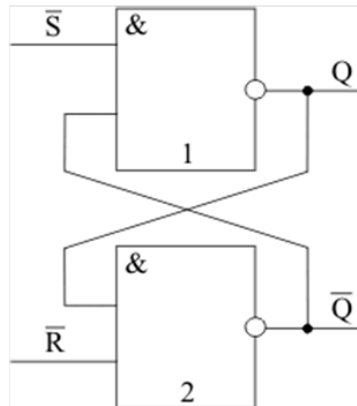
- Триггер – электронная схема, обладающая двумя устойчивыми состояниями. Переход из одного устойчивого состояния в другое происходит скачкообразно под воздействием управляющих сигналов. При этом также скачкообразно изменяется уровень напряжения на выходе триггера.
- Триггеры служат основой для построения регистров, счетчиков и других элементов, обладающих функцией хранения.
- Главной частью любого триггера является запоминающая ячейка (ЗЯ).

Триггеры (ЗЯ).



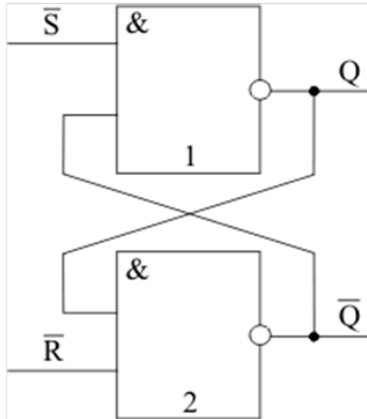
Входной сигнал S (Set) служит для установки ЗЯ в состояние "1" ($Q=1, \bar{Q}=0$). Сигнал R (Reset) устанавливает ЗЯ в состояние "0" ($Q=0, \bar{Q}=1$). Активными значениями для них являются сигналы низкого уровня.

Триггеры (ЗЯ).



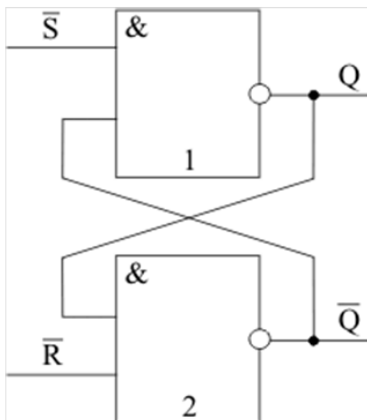
- Пусть на входы ЗЯ поданы сигналы: $S=0, R=1$. Тогда при любом исходном состоянии ЗЯ на выходе элемента 1 установится высокий уровень напряжения. Так как на входы элемента 2 поступают значения Q и R, то на его выходе будет сигнал низкого уровня. Таким образом, ЗЯ перейдет в состояние "1".
- Аналогично при $S=1, R=0$ запоминающая ячейка перейдет в состояние $Q=0, \bar{Q}=1$, то есть в "0".

Триггеры (ЗЯ).



Если $S=1, R=1$, то состояние ЗЯ будет определяться ее предыдущим состоянием. Если ЗЯ находилась в состоянии "1", то сигнал $Q=0$, поступающий на вход элемента 1, подтвердит состояние его выхода $Q=1$. На входы элемента 2 поступят сигналы только высокого уровня. Поэтому его выход будет находиться в состоянии $Q=0$, то есть не изменится. Если ЗЯ находилась в состоянии "0", то сигнал $Q=0$, поступающий на вход элемента 2, подтвердит состояние его выхода $Q=1$. В свою очередь, выход элемента 1 также останется без изменения. Таким образом, эта комбинация входных сигналов соответствует режиму хранения.

Триггеры (ЗЯ).



Если на входы S и R поданы сигналы низкого уровня ($S = R = 0$), то сигнал на выходах элементов 1 и 2 будет высоким ($Q = \bar{Q} = 1$). При переводе ЗЯ в режим хранения ($S = R = 1$), выходы элементов 1 и 2 могут установиться в произвольное состояние. Поэтому комбинация сигналов $S = R = 0$ на управляющих входах не используется.

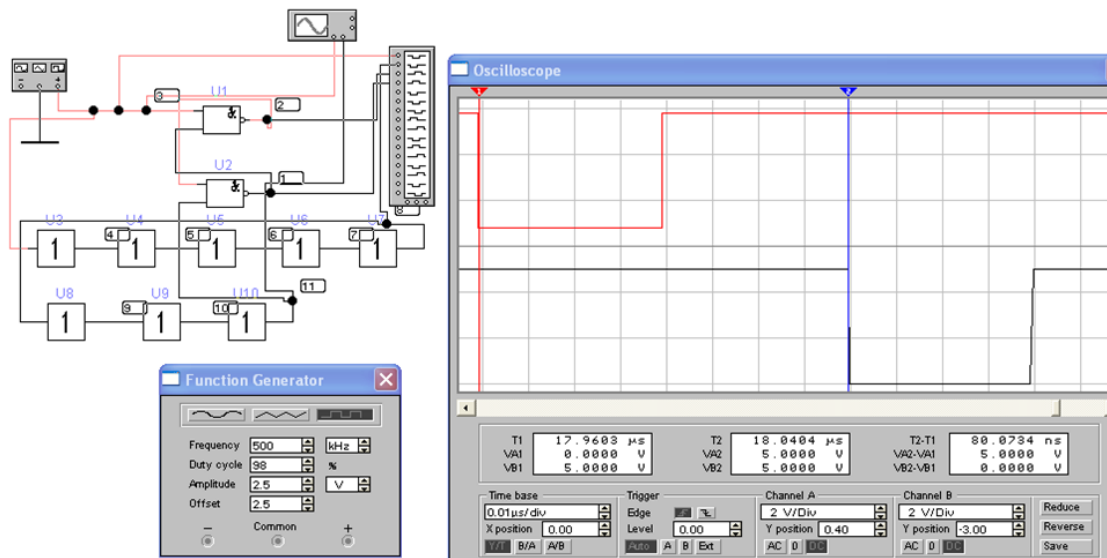
Триггеры (ЗЯ).

Таблица переходов RS триггера.

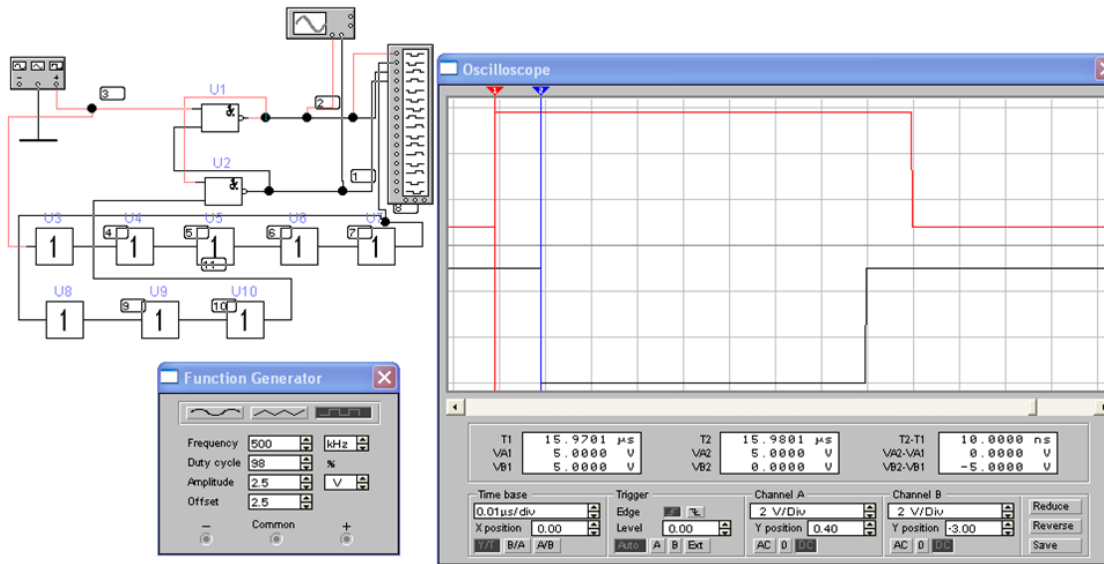
S	R	Q(t+1)	Функция
0	0	x	Запрещенная комбинация
0	1	1	Установка в "1"
1	0	0	Установка в "0"
1	1	Q(t)	Хранение

Работа триггерной схемы определяется таблицей переходов. Таблица переходов показывает изменение состояния триггера при изменении входных сигналов в зависимости от его текущего состояния. Таблица переходов запоминающей ячейки, показанной на предыдущих слайдах, представлена в таблице слева.

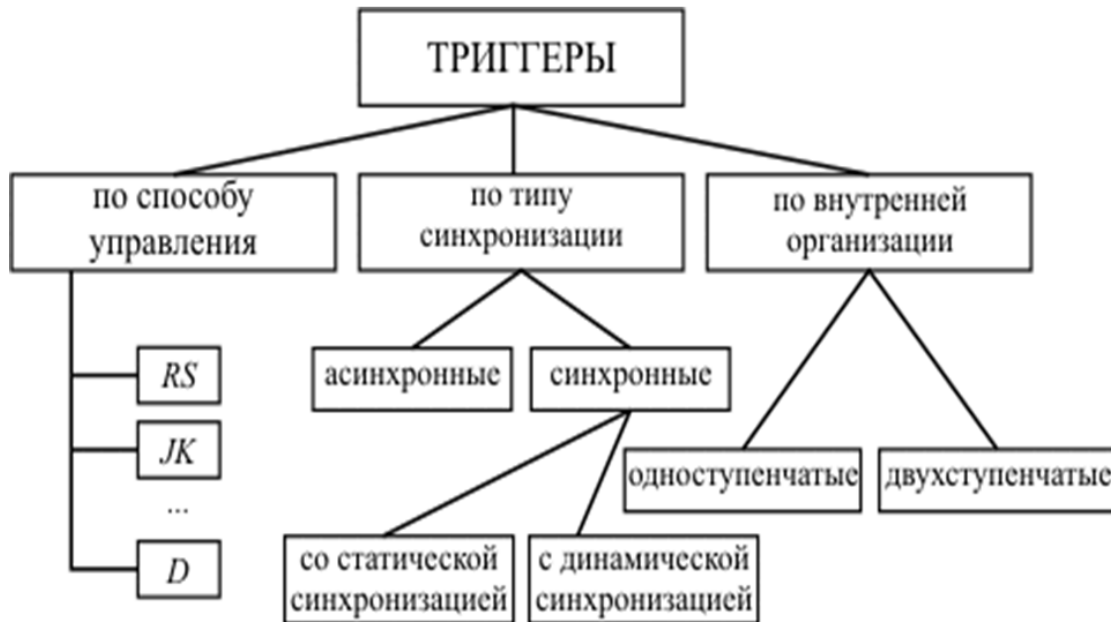
RS триггер (входные сигналы).



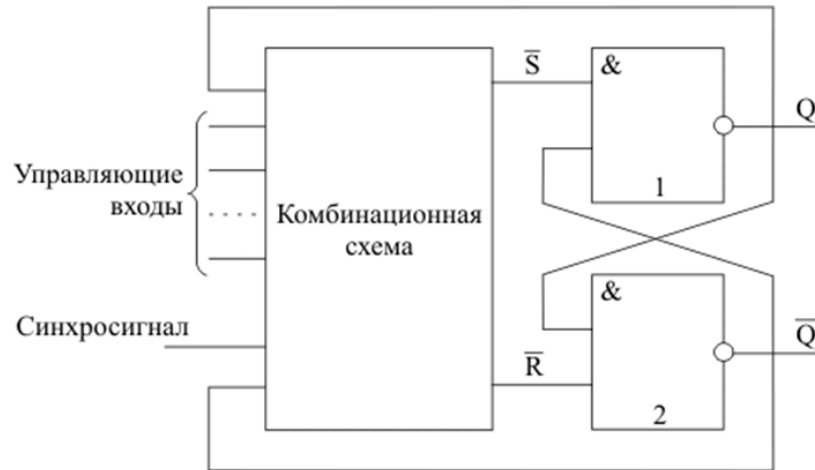
RS триггер (сигналы Q и неQ).



Классификация триггеров.

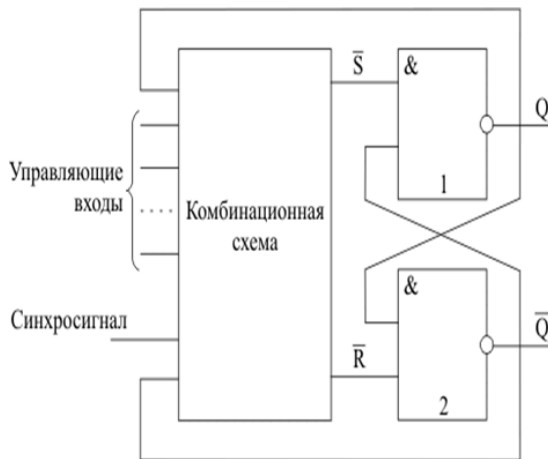


Синхронные триггеры.



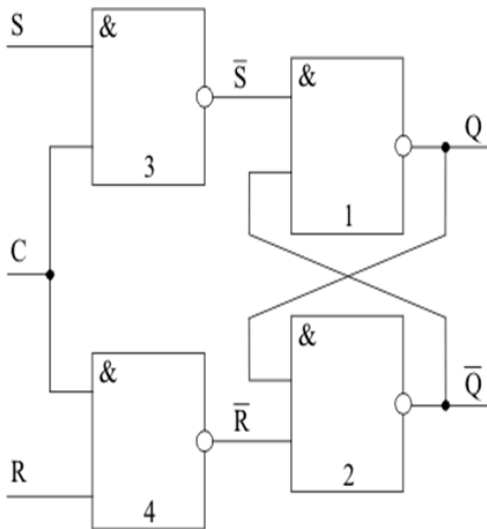
Триггер называется синхронным, если его таблица переходов хотя бы по одному управляющему входу реализуется под воздействием синхронизирующего сигнала.

Синхронные триггеры.



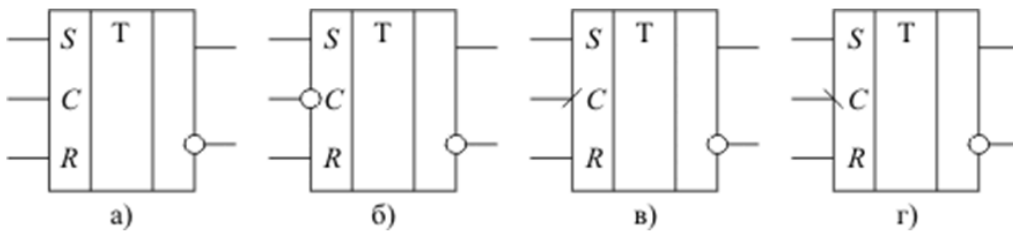
Основу синхронного одноступенчатого триггера составляет рассмотренная на предыдущем слайде запоминающая ячейка (элементы 1, 2). Комбинационная схема преобразует управляющие сигналы триггера, а также, для некоторых типов триггеров, сигналы Q и \bar{Q} с выходов ЗЯ в сигналы S и R на входах запоминающей ячейки. Синхросигнал C разрешает передачу на входы элементов 1 и 2 таких значений сигналов S и R , которые устанавливают ЗЯ в то или иное состояние. Неактивное значение синхросигнала обеспечивает на входах запоминающей ячейки состояние управляющих сигналов $S = R = 1$, что соответствует для нее режиму хранения.

Синхронный одноступенчатый RS триггер.

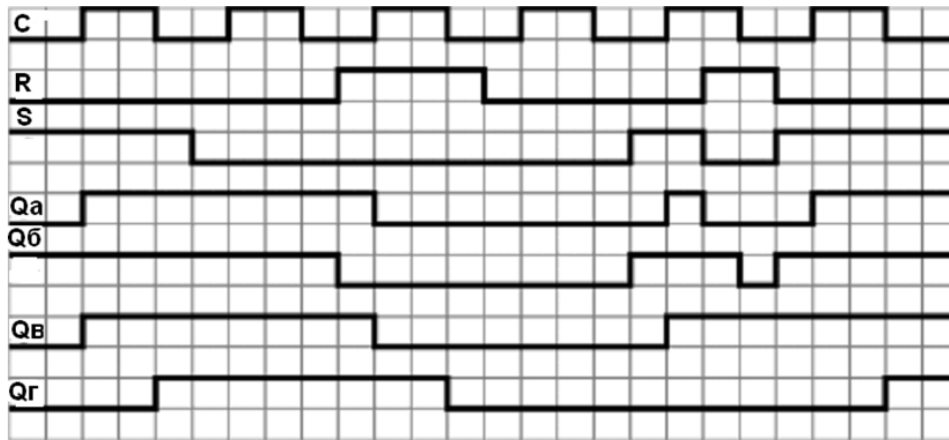


Представленный на слайде справа триггер имеет статическую синхронизацию, при которой управляющие сигналы активизируют входы S и R запоминающей ячейки во время высокого уровня сигнала на входе синхронизации (C).

УГО RS триггеров.

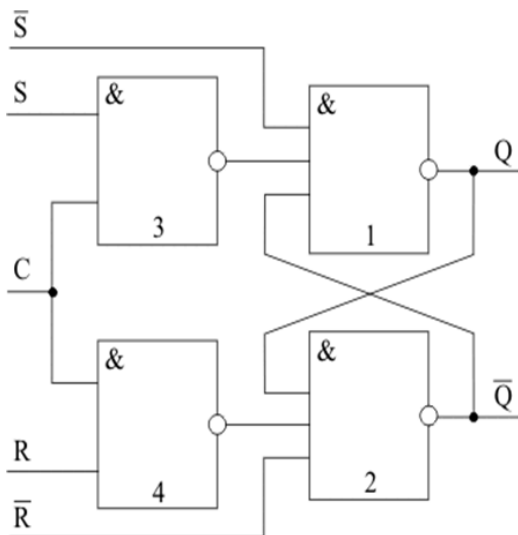


а - статическая синхронизация; б - статическая инверсная синхронизация; в - динамическая синхронизация передним фронтом синхросигнала; г - динамическая синхронизация задним фронтом синхросигнала



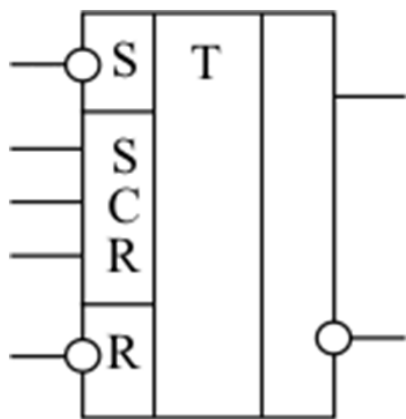
Временная диаграмма работы RS-триггера с различными типами синхронизации: Qa – статическая синхронизация; Qб– статическая инверсная синхронизация; Qв –динамическая синхронизация передним фронтом синхросигнала; Qг– динамическая синхронизация задним фронтом синхросигнала

Синхронный одноступенчатый RS-триггер с асинхронными установочными входами.



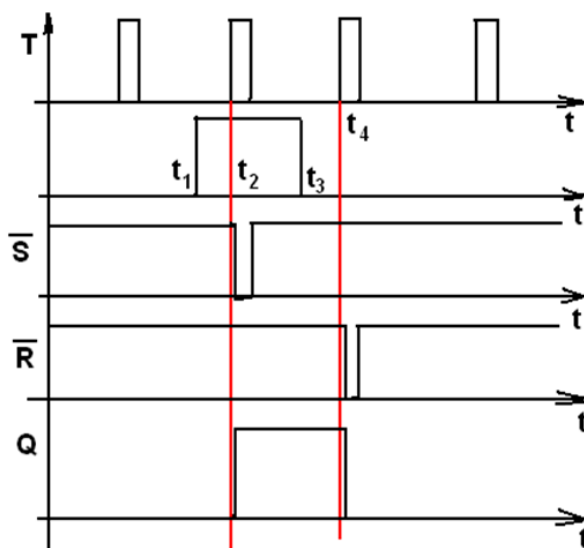
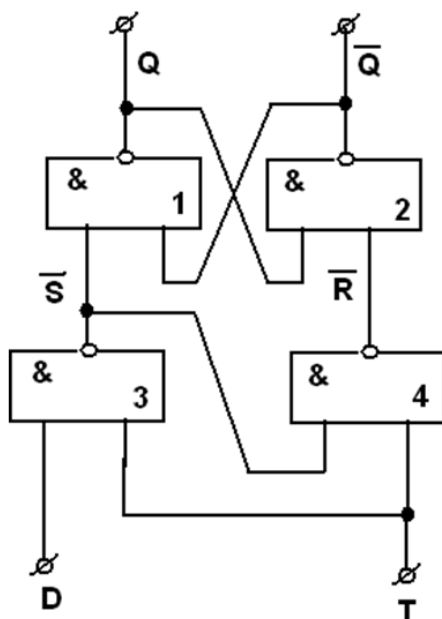
Синхронный триггер, помимо управляющих входов, воздействующих на его состояние при подаче сигнала синхронизации, может иметь входы, которые воздействуют на его состояние непосредственно. Обычно они используются для установки триггера в то или иное начальное состояние перед подачей последовательности синхросигналов. Схема синхронного RS-триггера с асинхронными входами установки в "0" и в "1" приведена на данном слайде слева.

УГО синхронный одноступенчатый RS-триггер с асинхронными установочными входами.

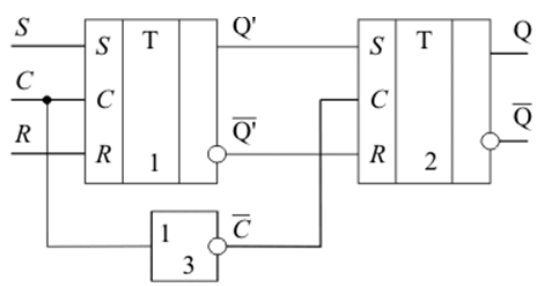


Сигналы, поступающие по асинхронным входам S и R, подаются непосредственно на входы запоминающей ячейки, образованной элементами 1 и 2, минуя цепь, управляемую синхросигналом (элементы 1 и 2), и вызывают переключение запоминающей ячейки.

D триггер.

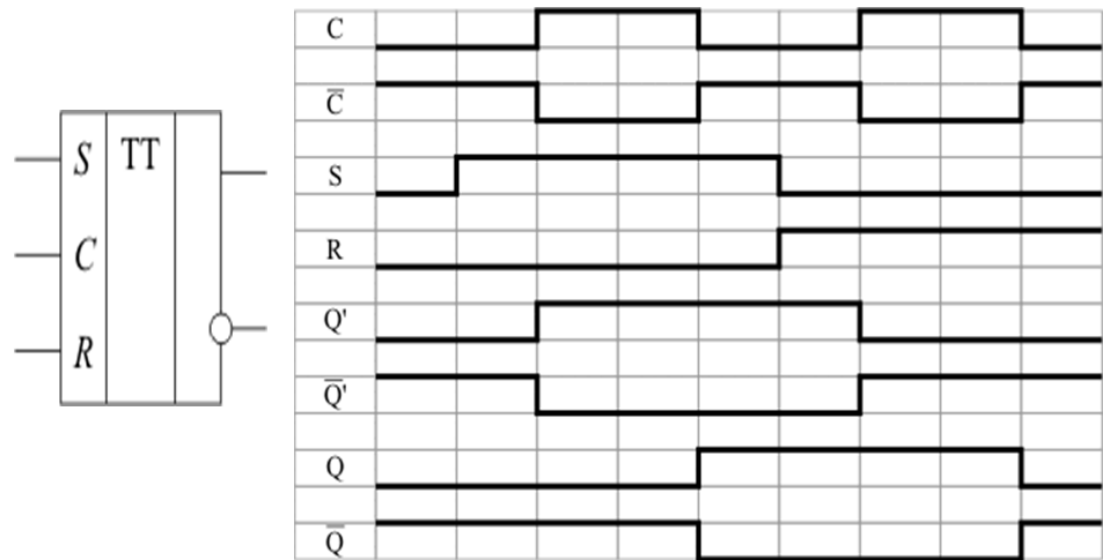


Двухступенчатый RS триггер.

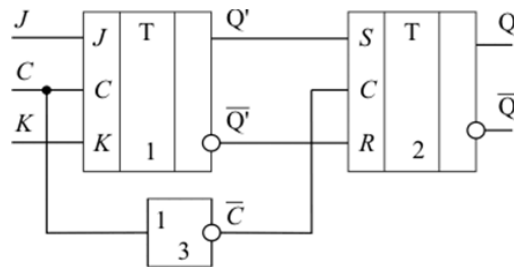


Двухступенчатый RS-триггер строится на основе двух одноступенчатых триггеров с прямой статической синхронизацией. Информация в первую ступень триггера (элемент 1) заносится во время действия высокого уровня синхросигнала. После того как синхросигнал на входе принимает низкое значение, элемент 1 переходит в режим хранения, а значение высокого уровня сигнала на выходе инвертора 3 обеспечивает запись состояния триггера 1 в триггер 2.

УГО двухступенчатого триггера и временная диаграмма работы.



Двухступенчатый триггер.



Первая ступень представляет собой одноступенчатый триггер, реализующий заданную таблицу переходов, в то время как вторая ступень – это всегда одноступенчатый синхронный RS-триггер.

Двухтактный JK триггер.

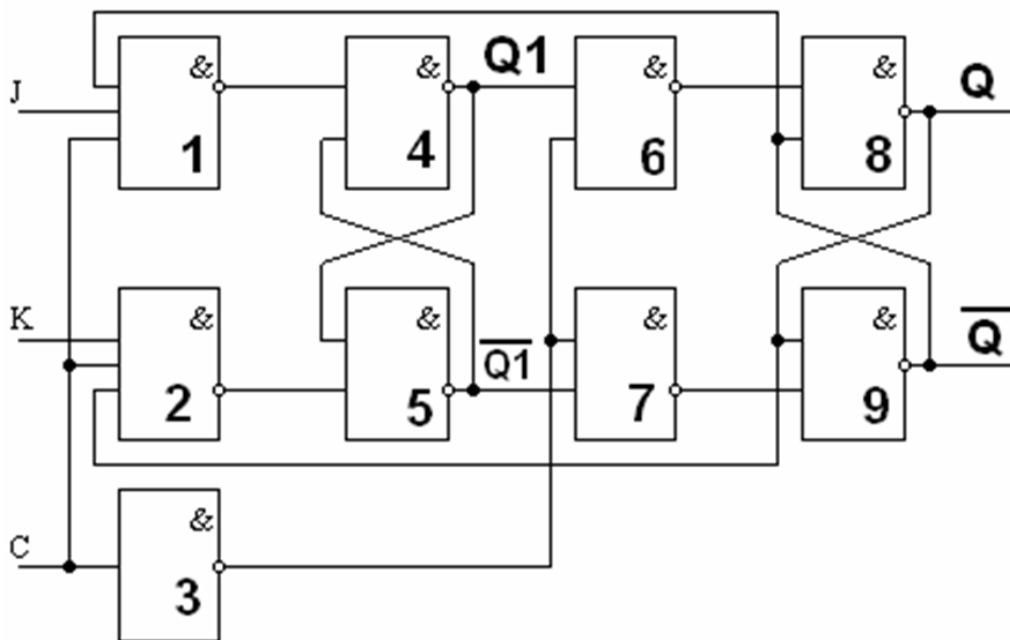


Таблица переходов JK триггера.

Q_n	Q_{n+1}	J	K
0	0	0	-
0	1	1	-
1	0	-	1
1	1	-	0

Регистры.

- Регистр — последовательностное логическое устройство, используемое для хранения n-разрядных двоичных чисел и выполнения преобразований над ними.
- Регистр представляет собой упорядоченную последовательность триггеров, число которых соответствует числу разрядов в слове. С каждым регистром обычно связано комбинационное цифровое устройство, с помощью которого обеспечивается выполнение некоторых операций над словами.
- Фактически любое цифровое устройство можно представить в виде совокупности регистров, соединенных друг с другом при помощи комбинационных цифровых устройств.
- Основой построения регистров являются D-триггеры.

Операции в регистрах.

- **прием слова в регистр;**
- **передача слова из регистра;**
- **поразрядные логические операции;**
- **сдвиг слова влево или вправо на заданное число разрядов;**
- **преобразование последовательного кода слова в параллельный и обратно;**
- **установка регистра в исходное состояние (сброс).**

ВЫВОДЫ

В курсе лекций рассмотрены основные темы курса «Электроника и микроэлектроника» понятие диода, транзистора и составление электрических принципиальных схем с их использование, разновидности диодов и транзисторов, их технические параметры, разновидности и способы решения электротехнических задач при отсутствии необходимые электронных радио элементов.

Данный конспект лекций составлен на основе лекционного курса, читаемого в МГТУ им. Н.Э. Баумана на кафедре иу4 преподавателем Аристов Б. К. Курс лекций рекомендован к выполнению текущих аттестационных мероприятий и подготовки к зачету по предмету «Электроника и микроэлектроника».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Слайды лекций Аристова Б.К.