

# Активные электронные компоненты Биполярные транзисторы

---

КУРС ЛЕКЦИЙ

ЧУ ПО «СОЦИАЛЬНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОЛЛЕДЖ»

ПРЕПОДАВАТЕЛЬ: БОРИСОВ АЛЕКСЕЙ АЛЬБЕРТОВИЧ

**RAZUMDOM**



# Активные компоненты

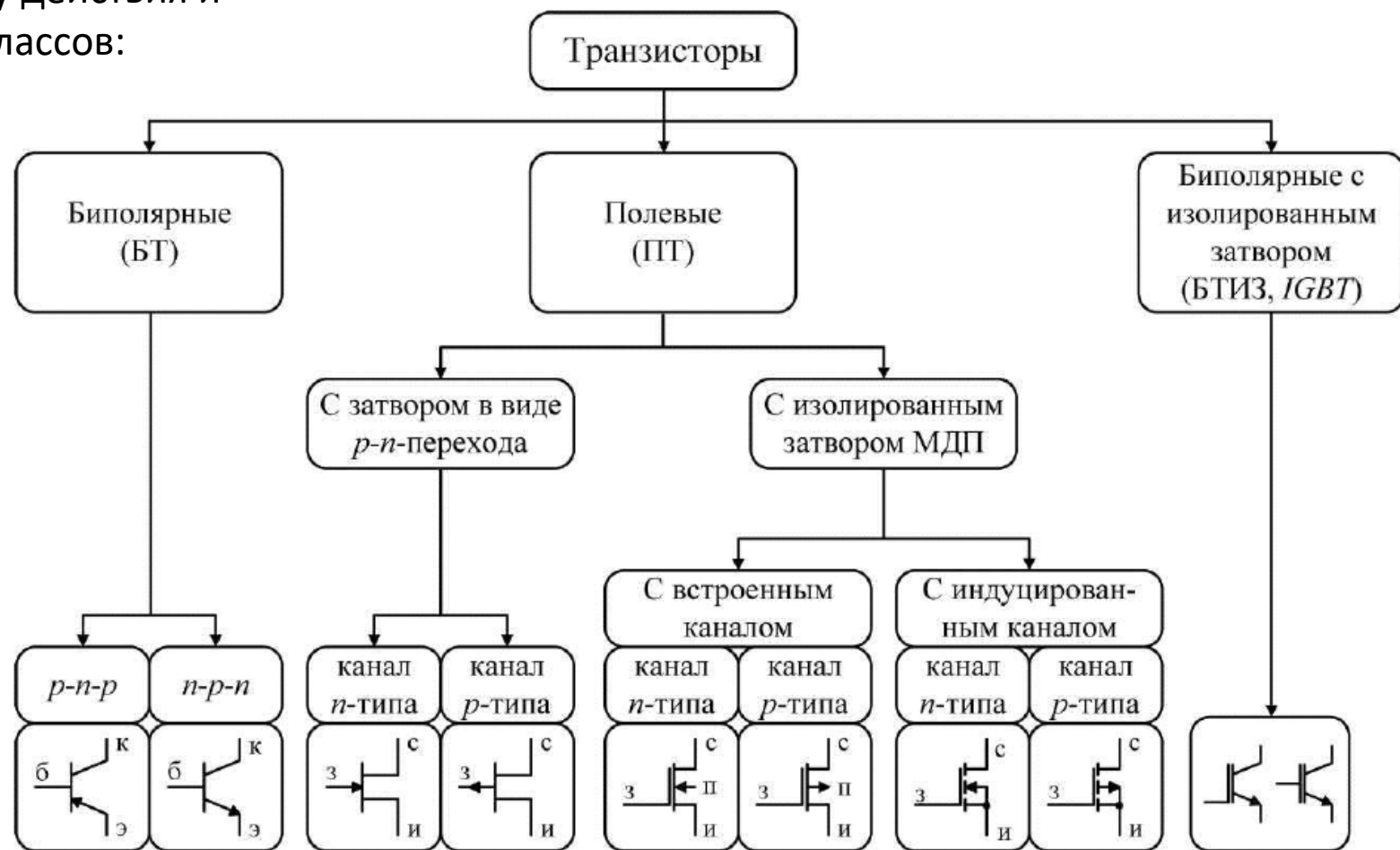
1. Диоды
2. Тиристоры
3. Биполярные транзисторы
4. Полевые и MOSFET транзисторы
5. IGBT транзисторы
6. Микросхемы



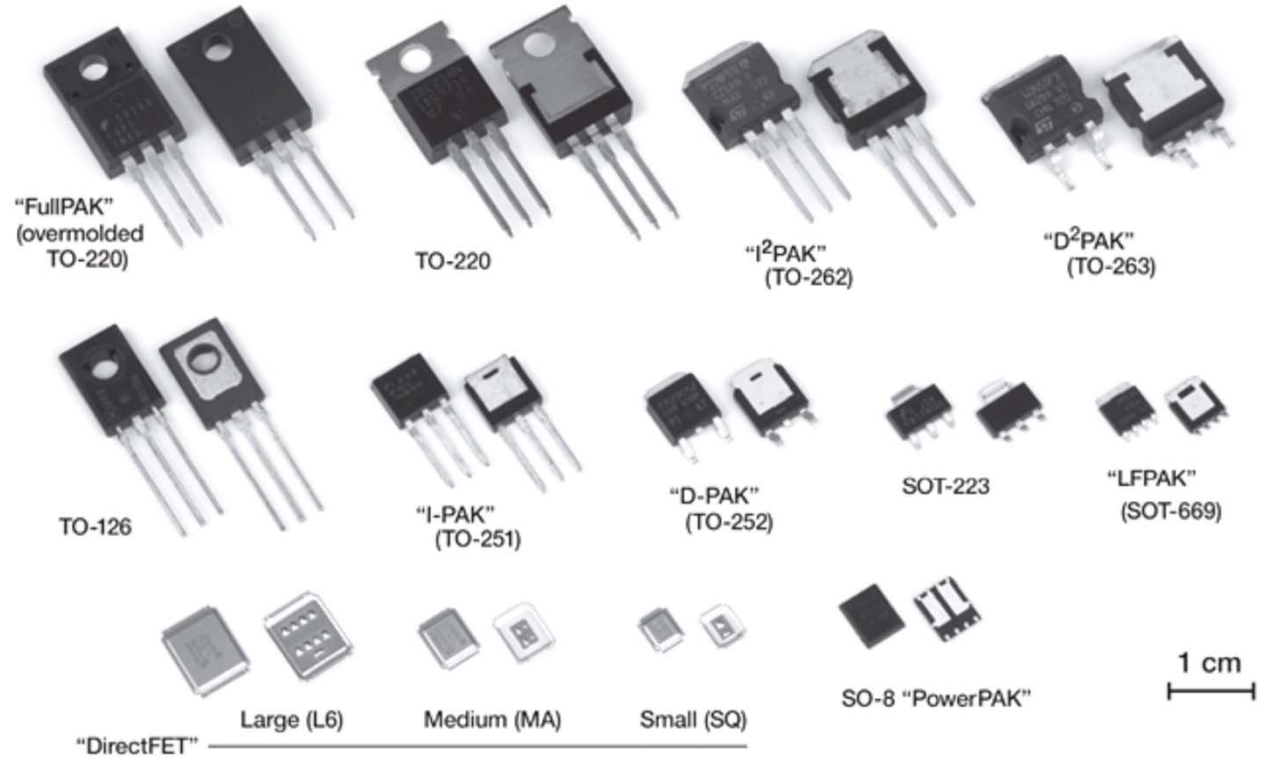
# Классификация транзисторов

Транзисторы по структуре, принципу действия и параметрам делятся на несколько классов:

- **Биполярные**
- **Полевые (униполярные).**
- **IGBT биполярные транзисторы с изолированным затвором**



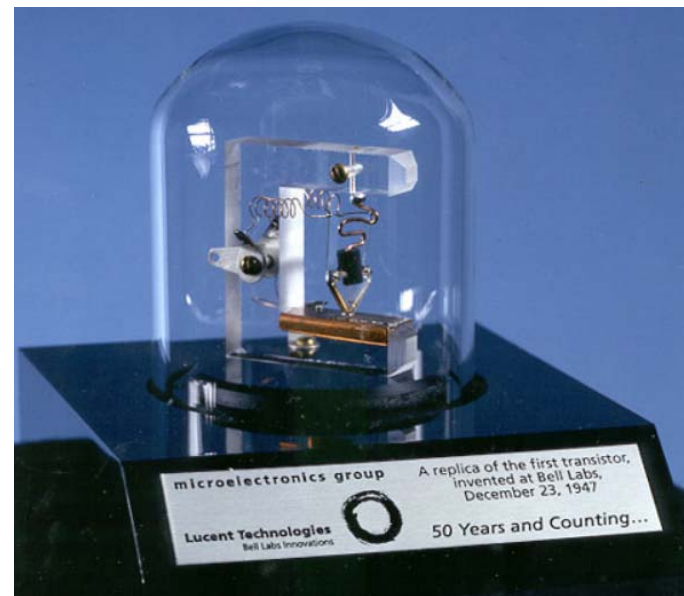
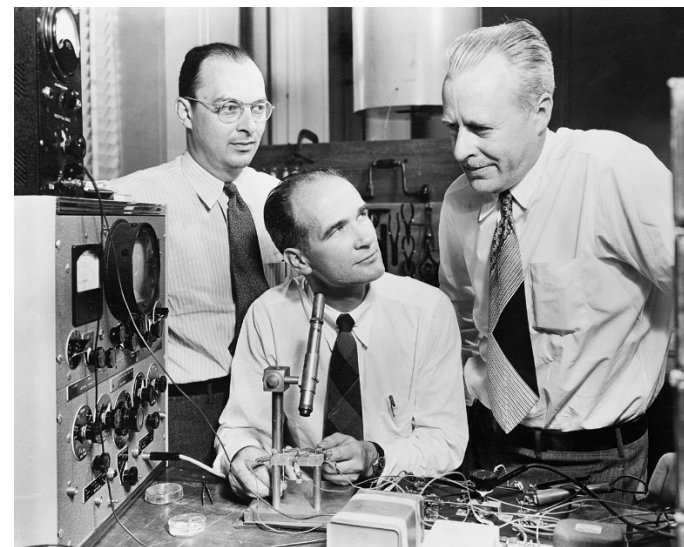
**Транзистор** (transistor), полупроводниковый триод — электронный компонент из полупроводникового материала, способный небольшим входным сигналом управлять значительным током в выходной цепи, что позволяет использовать его для усиления, генерирования, коммутации и преобразования электрических сигналов.



# История транзисторов

В 1929—1933 годы в ЛФТИ Олег Лосев под руководством академика Иоффе провёл ряд экспериментов с полупроводниковым устройством, конструктивно повторяющим точечный транзистор на кристалле карборунда (SiC), однако достаточного коэффициента усиления получить тогда не удалось. Изучая явления электролюминесценции в полупроводниках, Лосев исследовал около 90 различных материалов, особенно выделяя кремний, и в 1939 году он вновь упоминает о работах над трёхэлектродными системами.

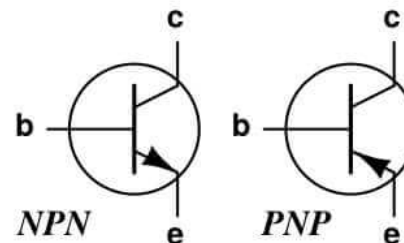
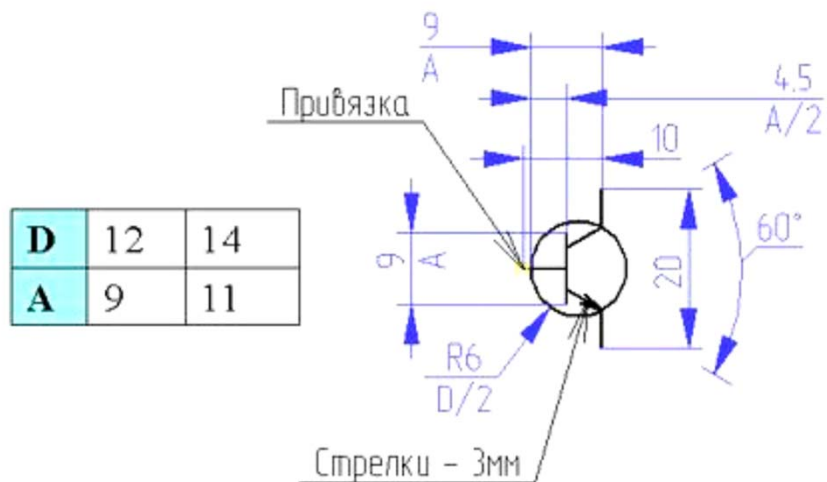
К 1980-м годам транзисторы, благодаря своей миниатюрности, экономичности, устойчивости к механическим воздействиям и невысокой стоимости, практически полностью вытеснили электронные лампы из малосигнальной электроники. Благодаря своей способности работать при низких напряжениях и значительных токах, транзисторы позволили уменьшить потребность в электромагнитных реле и механических переключателях в оборудовании, а благодаря способности к миниатюризации и интеграции позволили создать интегральные схемы, заложив основы микроэлектроники. С 1990-х в связи с появлением новых мощных транзисторов, стали активно вытесняться электронными устройствами трансформаторы, электромеханические и тиристорные ключи в силовой электротехнике, начал активно развиваться частотно-регулируемый привод и инверторные преобразователи напряжения.



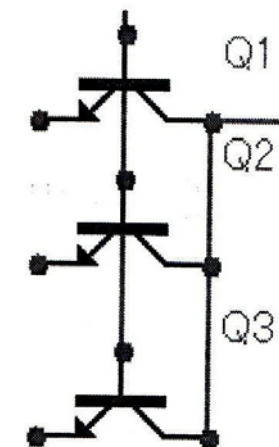
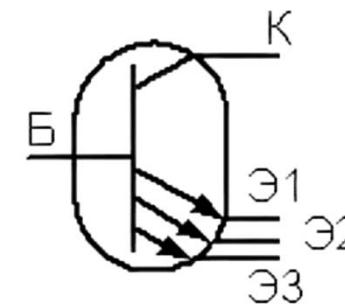
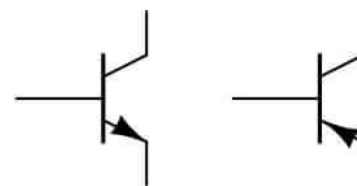
# Условное графическое обозначение

Условное графическое обозначение транзисторов (УГО) ГОСТ 2.730-73  
 Для биполярных, полевых, IGBT и других видов различное обозначение.

## УГО биполярного транзистора.



Обозначение бескорпусного биполярного транзистора, например, в составе принципиальных схем чипов.

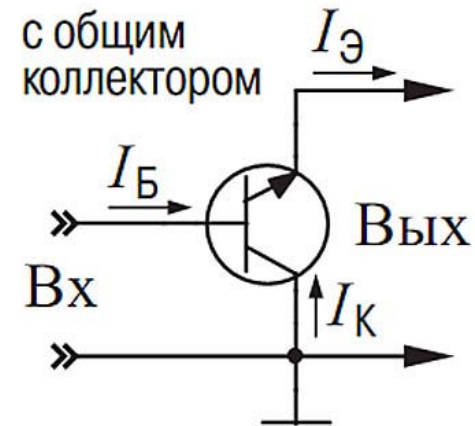
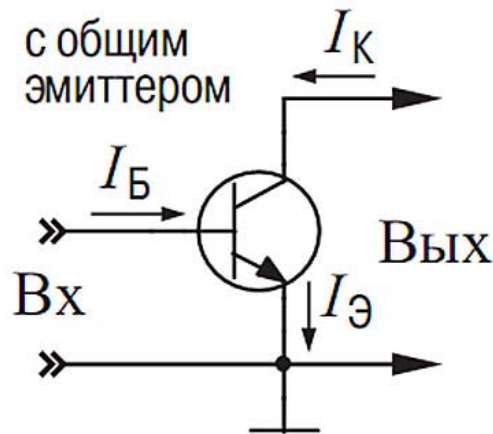
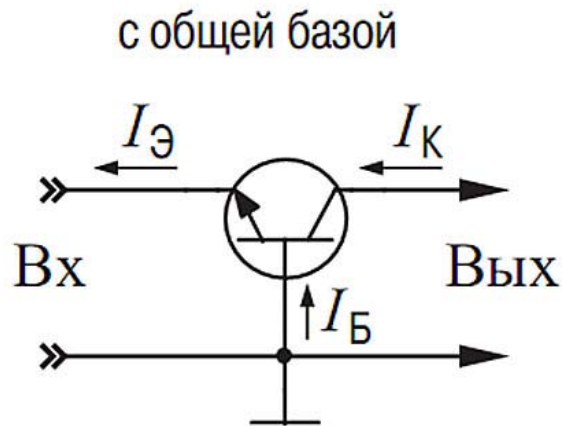
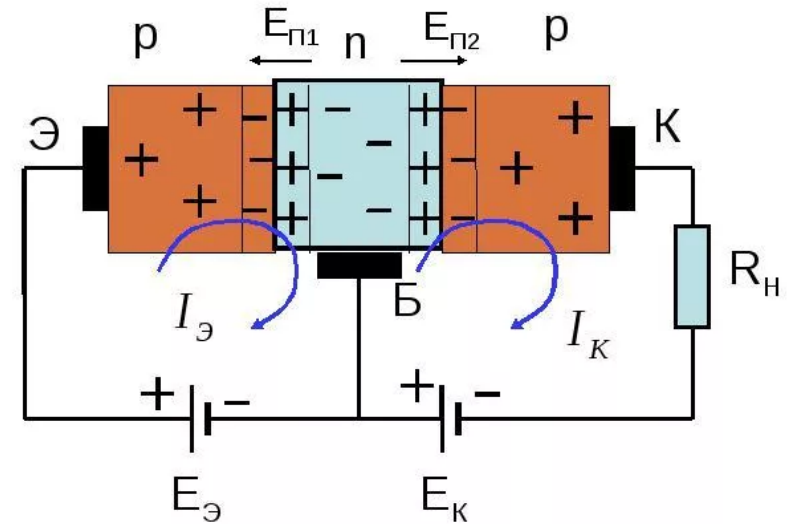


# Биполярный транзистор

В биполярном транзисторе используются полупроводники с обоими типами проводимости, он работает за счёт взаимодействия двух близко расположенных на кристалле р-п-переходов и управляется изменением тока через база-эмиттерный переход.

Средний слой является базой. Он выполняется тонким, что чрезвычайно важно. Кроме того, его удельное сопротивление относительно высоко. Два оставшихся слоя являются коллектором и эмиттером.

При этом вывод эмиттера в схеме «с общим эмиттером» является общим для управляющего и выходного токов. Существуют также схемы «с общим коллектором (эмиттерный повторитель)» и «с общей базой».

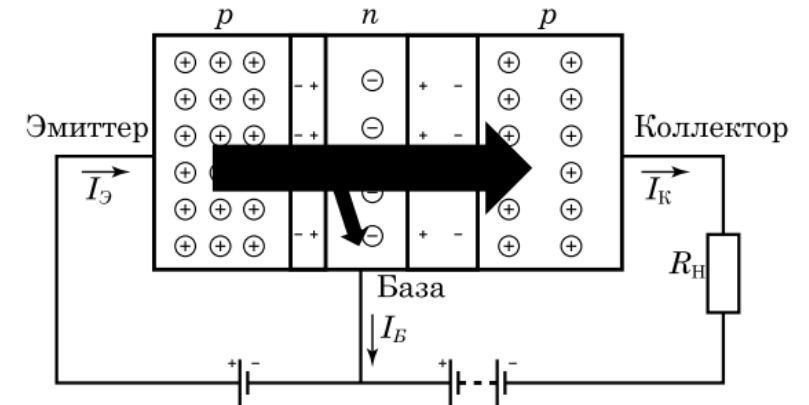


# Принцип действия биполярного транзистора

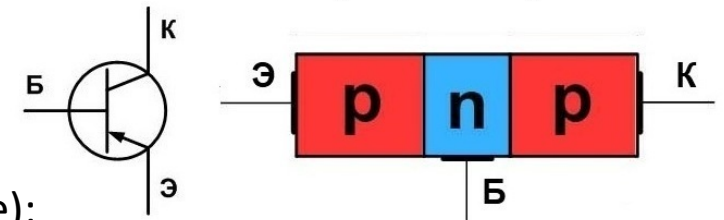
Переход эмиттер–база включается в прямом направлении, в результате основные носители заряда попадают в базу и создают ток базы  $I_B$ . Концентрация основных носителей заряда в базе значительно меньше, чем в эмиттере и коллекторе, поэтому в базе **рекомбинирует** малая часть зарядов из эмиттера, кроме того, база выполняется достаточно узкой и основное количество зарядов, попавшее в базу из эмиттера, уже имея достаточно высокую скорость и получая дополнительное ускорение от поля перехода база–коллектор, пролетает в коллектор, создавая ток коллектора  $I_K$ , значительно превышающий ток базы  $I_B$ .

1. База выполняется слаболегированной (т.е. количество основных носителей зарядов в ней значительно меньше чем в коллекторе и эмиттере);
2. База выполняется достаточно узкой;
3. Эмиттер выполняется сильнолегированным (т.е. количество основных носителей зарядов в нём значительно больше чем в коллекторе и базе).

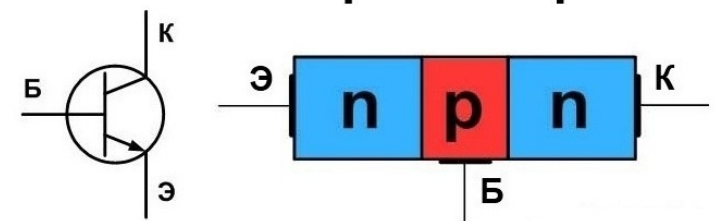
**Рекомбинация** — процесс замещения электронами дырок, в результате чего пара носителей заряда «электрон–дырка» исчезает. Сопровождается выделением энергии в виде фотона.



**PNP транзистор**



**NPN транзистор**





# Биполярный транзистор

Удельные сопротивления областей эмиттера и коллектора ниже, чем у базы. Кроме того, сопротивление эмиттера несколько ниже сопротивления коллектора. Зато коллектор имеет большую площадь (и объем). Три последовательно размещенных слоя полупроводника дают нам две области в которых эти слои соприкасаются. Эти области называются переходами, точнее p-n переходами. Что бы различать эти переходы им даны названия: переход база-коллектор (БК), переход база-эмиттер(БЭ). Первые транзисторы были изготовлены на основе германия. В настоящее время биполярные транзисторы изготавливают в основном из кремния и арсенида галлия. По конструкции и технологии изготовления различают биполярные транзисторы **сплавные, эпитаксиально - диффузионные, планарные.**

По технологии изготовления транзисторы делятся на **сплавные, планарные**, а также **диффузионно-сплавные, мезопланарные** и **эпитаксиально-планарные**.

Сплавной

Диффузионно-сплавной

Диффузионно-планарный

Мезопланарный

Эпитаксиально-планарный

Конструктивное оформление биполярного транзистора

PN2 222A A110

3 A

2 35

MyShared

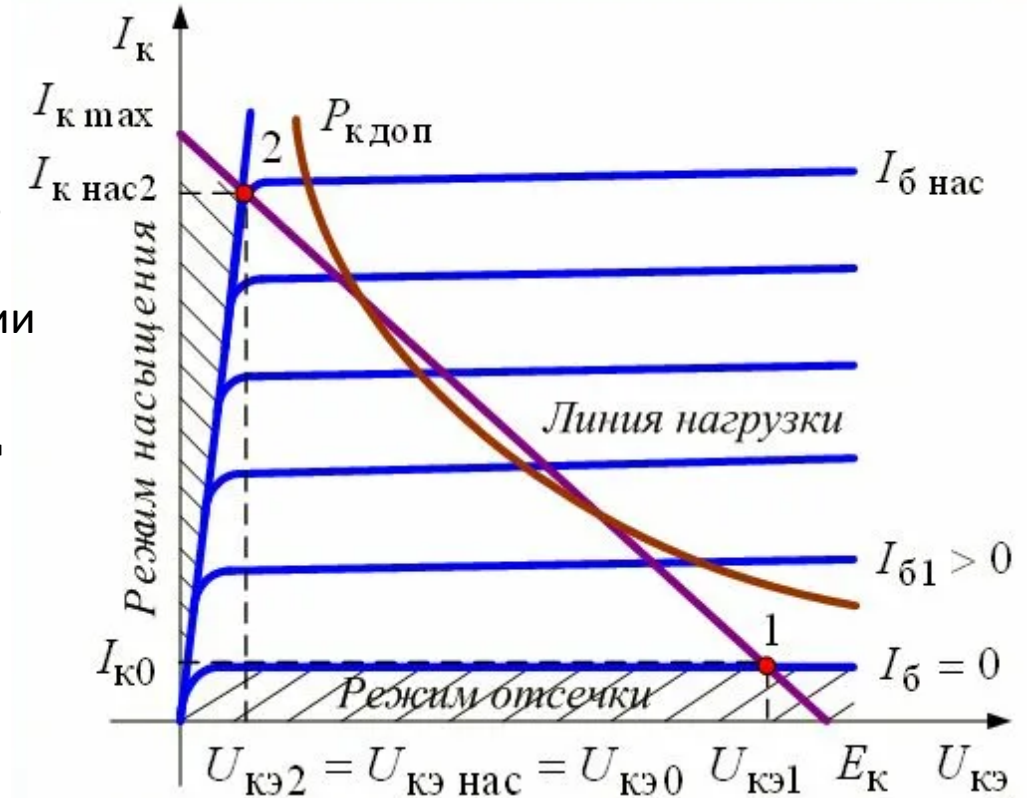
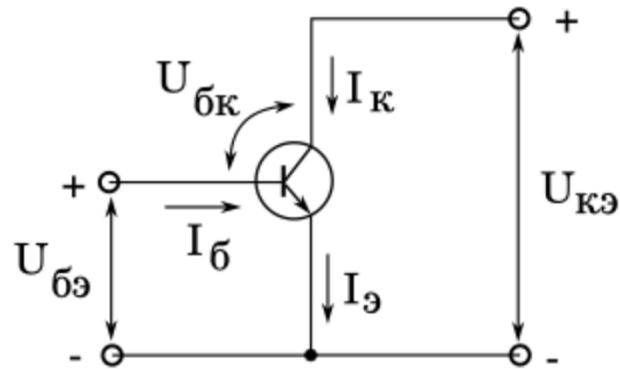
# Биполярный транзистор

Транзистор может находиться (работать) в трех основных режимах. В **режиме отсечки**, в **режиме насыщения**, в **активном режиме**. Самым интересным является именно активный режим, в этом режиме транзистор работает в усилительных каскадах.

В **активном режиме** переход БЭ смещен в прямом направлении и через него протекает ток. Переход БК смещен в обратном направлении и ток, для идеального транзистора, через переход не течет.

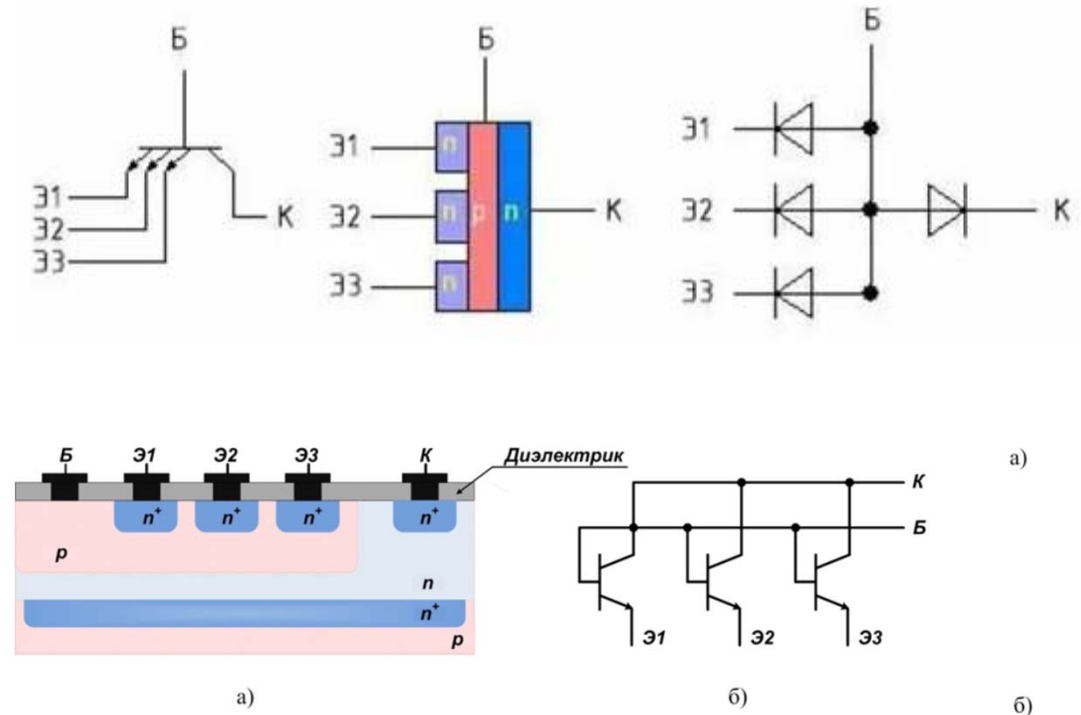
$$I_{\text{Э}} = I_{\text{К}} + I_{\text{Б}}$$

$$U_{\text{КЭ}} = U_{\text{БЭ}} + U_{\text{БК}}$$



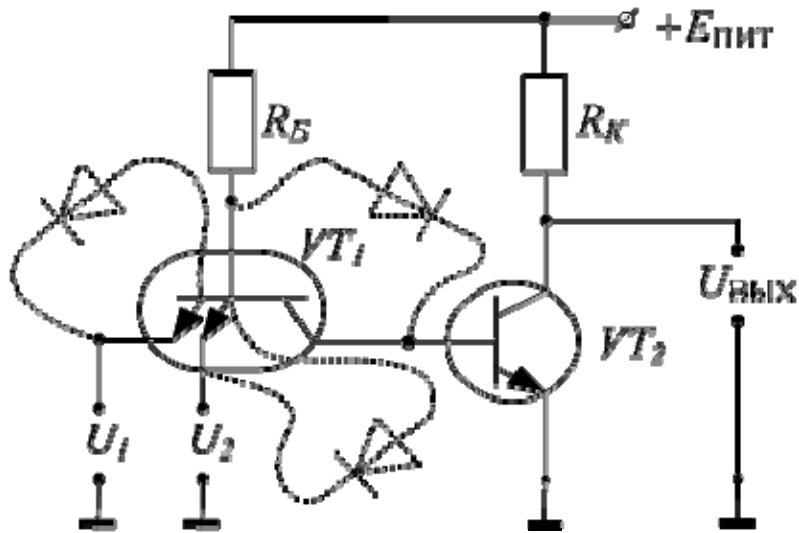
# Многоэмиттерный биполярный транзистор

- Основная область применения МЭТ – цифровые микросхемы транзисторно-транзисторной логики (ТТЛ). В этих микросхемах они включаются на входе и выполняют функцию диодной логической ячейки, состоящей из  $m+1$  диодов, где  $m$  – число эмиттеров, являющихся входами схемы ТТЛ.
- Многоэмиттерный транзистор можно представить в виде совокупности отдельных  $n$ - $p$ - $n$  транзисторов, число которых равно числу эмиттеров. Все базовые выводы этих транзисторов, как и коллекторные, соединены между собой.
- Многоэмиттерные транзисторы заменяют диоды в диодно-транзисторной логике (DTL), создавая транзисторно-транзисторную логику (ТТЛ), и тем самым позволяют сократить время переключения и рассеиваемую мощность.

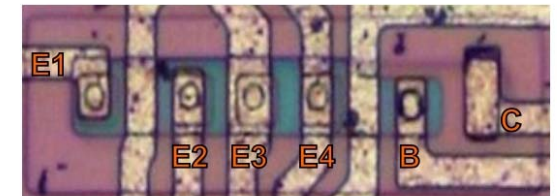
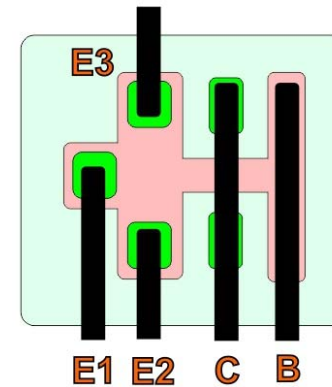
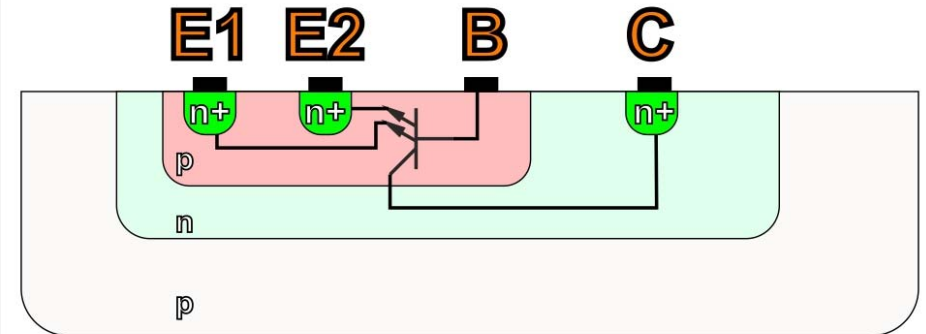


# Многоэмиттерный биполярный транзистор

Главная особенность использования МЭТ в схемах ТТЛ состоит в том, что в любом состоянии схемы коллекторный переход МЭТ, включенного на ее входе, смещен в прямом направлении. Следовательно, отдельные транзисторы находятся в инверсном режиме, либо в режиме насыщения в зависимости от напряжения на соответствующем эмиттере.



Многоэмиттерный NPN транзистор

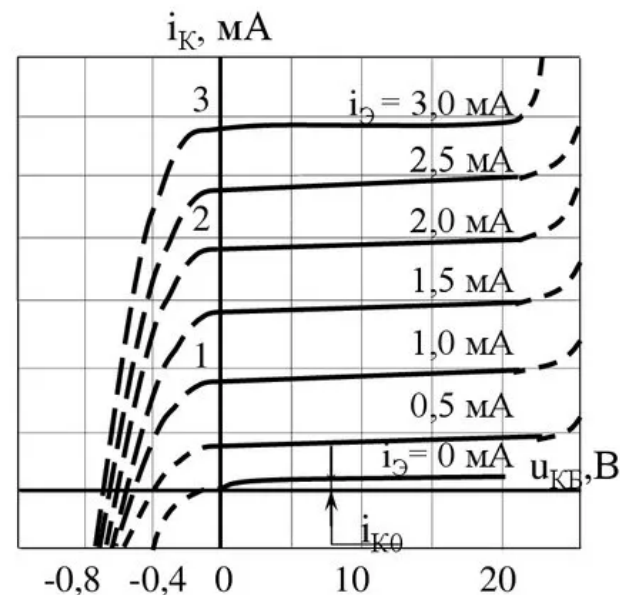
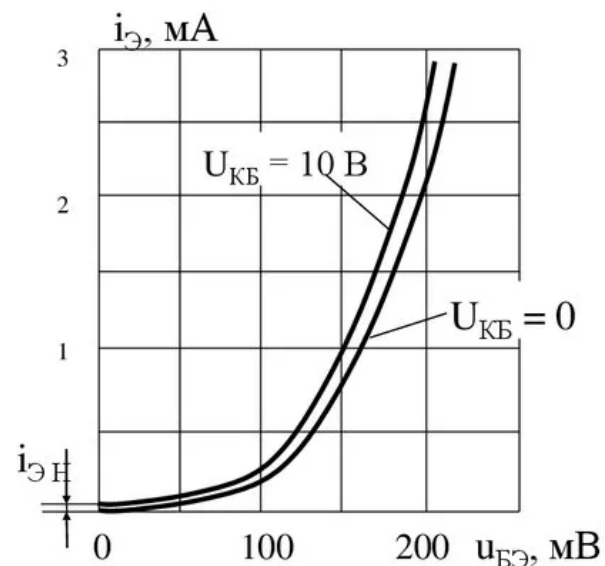


# Характеристики биполярного транзистора

**Работа транзистора характеризуется семействами входных и выходных характеристик**

**Входные характеристики** показывают зависимость тока базы ( $I_B$ ) от напряжения между базой и эмиттером ( $U_{БЭ}$ ), при постоянном напряжении, приложенном к коллектору ( $U_{КЭ}$ ). Входные характеристики слабо зависят от напряжения на коллекторе, поэтому обычно приводят две зависимости (например, при  $U_{КЭ} = 0$  и  $10V$ ).

**Выходные характеристики** показывают зависимость тока коллектора ( $I_K$ ) от напряжения между коллектором и эмиттером ( $U_{КЭ}$ ), при постоянном значении тока базы ( $I_B$ ). Выходные характеристики приводятся для достаточно большого (5 и более) значений тока базы (0.5мА, 1.0мА, 1.5мА, и т.д.).



# Характеристики биполярного транзистора

При расчёте усилителей с общим эмиттером наибольшее распространение получили  $h$ -параметры, связывающие токи и напряжения с помощью следующей системы линейных уравнений:

Физический смысл  $h$ -параметров следующий:

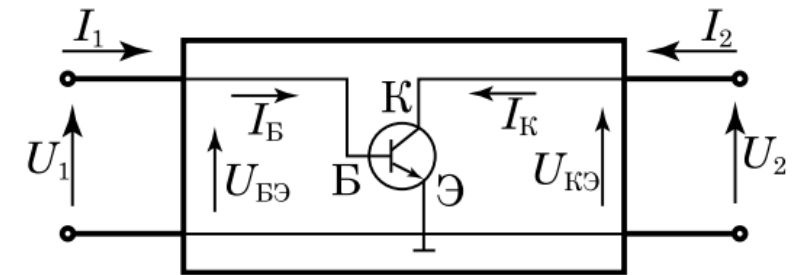
$$h_{11} = \left. \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_{Б}} \right|_{U_{КЭ}=\text{const}} \quad \text{- входное сопротивление, при коротком замыкании на выходе;}$$

$$h_{12} = \left. \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta U_{КЭ}} \right|_{I_{Б}=\text{const}} \quad \text{- коэффициент обратной связи по напряжению;}$$

$$h_{21} = \left. \frac{\Delta I_{К}}{\Delta I_{Б}} \right|_{U_{КЭ}=\text{const}} \quad \text{- коэффициент передачи тока при коротком замыкании на выходе;}$$

$$h_{22} = \left. \frac{\Delta I_{К}}{\Delta U_{КЭ}} \right|_{I_{Б}=\text{const}} \quad \text{- выходная проводимость при холостом ходе на входе}$$

$$\begin{cases} U_1 = h_{11}I_1 + h_{12}U_2 \\ I_2 = h_{21}I_1 + h_{22}U_2 \end{cases}$$



Помимо  $h$ -параметров, применяются коэффициенты передачи тока эмиттера ( $\alpha = \Delta I_{К}/\Delta I_{Э}$ ) и тока базы ( $\beta = \Delta I_{К}/\Delta I_{Б}$ ). Коэффициент  $\beta = (20 \dots 200)$  и может использоваться как основной параметр.

# Характеристики биполярного транзистора

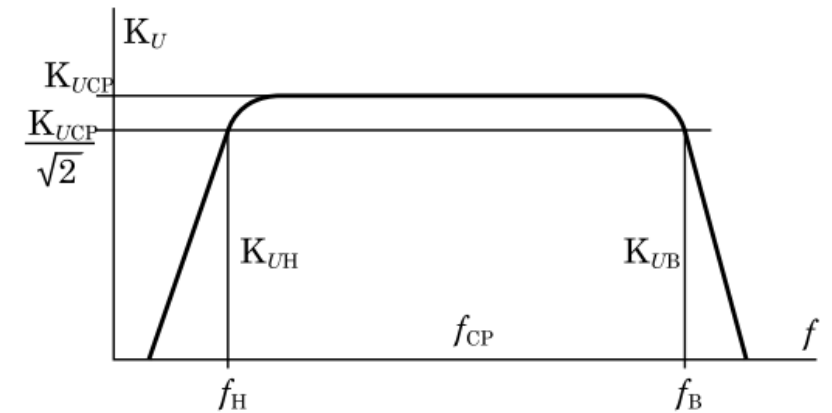
**Амплитудно–частотная характеристика (АЧХ)** показывает зависимость коэффициента усиления от частоты.

Участок ограничен в области низких частот **нижней граничной частотой**  $f_H$ , а в области высоких — **верхней граничной частотой**  $f_B$ . Значения  $f_H$  и  $f_B$  определяются величиной коэффициента частотных искажений, равного отношению коэффициента усиления на средней частоте ( $f_{CP}$ ), к коэффициенту усиления на нижней ( $f_H$ ) или верхней ( $f_B$ ) частоте:

$$M = \frac{K_{UCP}}{K_{UH}} \text{ или } M = \frac{K_{UCP}}{K_{UB}}$$

Усилители делятся на:

1. **Усилители постоянного тока, (УПТ)** – у них нижняя частота АЧХ приближается к 0 ( $f_H \rightarrow 0$ ) а верхняя частота может достигать  $10^3 \dots 10^8$  Гц.
2. **Усилители низкой частоты (УНЧ)** – нижняя частота десятки герц, верхняя достигает сотен килогерц (для усилителей звуковой частоты (УЗЧ) —  $f_B = 15 \dots 20000$  Гц).
3. **Усилители высокой частоты (УВЧ)** – диапазон частот начинается от сотен кГц и до десятков и сотен МГц.
4. **Широкополосные усилители (ШПУ)** – усиливают частоты от десятков герц до сотен мегагерц.
5. **Узкополосные или избирательные усилители** – применяются для усиления сигналов в узком диапазоне частот.



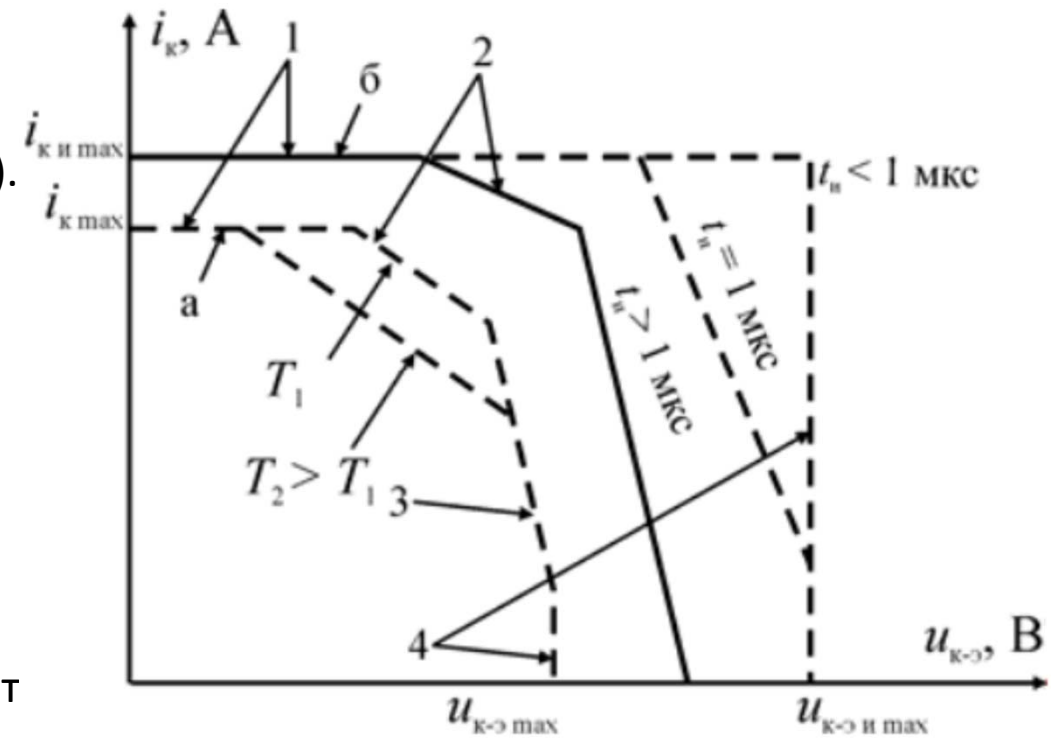
**Полоса пропускания усилителя  $\Delta f$** , характеризует диапазон частот, на котором коэффициент искажений  $M$  не превышает допустимые значения и равен разности между верхней и нижней частотами усилителя:

$$\Delta f = f_B - f_H$$

# Области безопасной работы биполярного транзистора

**Область безопасной работы** транзистора определяет границы интервала надежной работы транзистора без захода в область одного из видов пробоя. Обычно область безопасной работы (ОБР) строится в координатах  $i_k = f(u_{кэ})$ .

- Различают статическую и импульсную ОБР. Статическая ОБР (линия а) ограничивается участками: токового (1), теплового (2), вторичного (3) и лавинного пробоев (4).
- Импульсная ОБР (линия б) определяется максимальным импульсным током коллектора  $i_k$  и  $t_{мах}$  и максимальным импульсным напряжением пробоя  $u_{кэ}$  и  $t_{мах}$ . При малых длительностях импульсов на ней могут отсутствовать участки, обусловленные тепловым пробоем. При длительности импульса менее 1 мкс импульсная ОБР имеет только две границы  $i_k$  и  $t_{мах}$  и  $u_{кэ}$  и  $t_{мах}$ . При увеличении длительности импульса появляются участки, ограничивающие ОБР за счет развития вторичного (3) и теплового (2) пробоев.
- Границы областей безопасной работы транзистора зависят от температуры его корпуса.





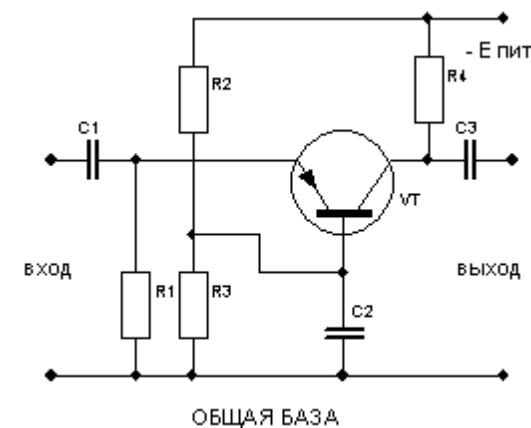
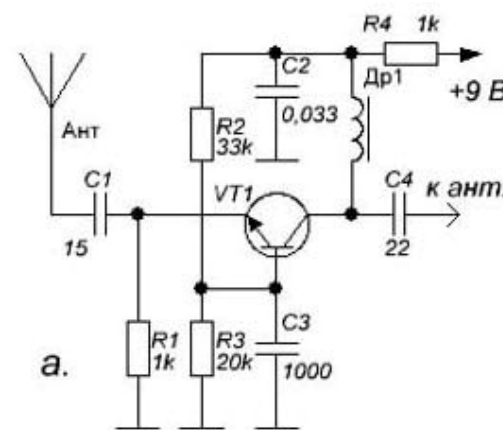
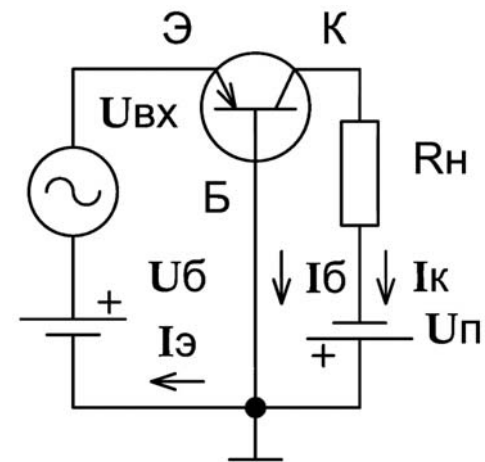
## Схемы включения биполярного транзистора

В зависимости от того, какой вывод транзистора подключен одновременно ко входу и выходу схемы, различают три схемы включения

- Схема с **общим эмиттером (ОЭ)**
- Схема с **общей базой (ОБ)**
- Схема с **общим коллектором (ОК)**

Схемы «с **общей базой**» означает - вывод базы является общим для входной и выходной цепи.

Коэффициент усиления по мощности данной схемы включения транзистора меньше по сравнению со схемой с общим эмиттером. Имеет коэффициент усиления по току близкий к 1. В данной схеме производится усиление только по напряжению. Схема с общей базой обычно применяется на высоких частотах.



# Схемы включения биполярного транзистора

## Усилительный каскад с ОЭ

Схемы «с **общим эмиттером**» означает - вывод эмиттера является общим для входной и выходной цепи.

Каскад с общим эмиттером работает следующим образом:

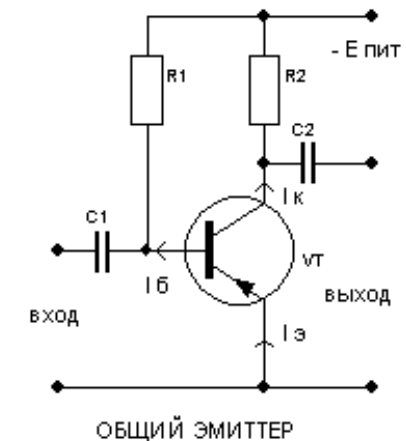
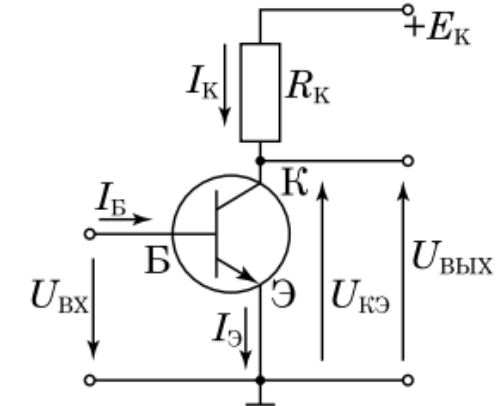
1. При увеличении входного напряжения ( $U_{ВХ} \uparrow$ ) ширина  $p-n$  перехода между коллектором и базой уменьшается, в результате возрастает ток в цепи эмиттера ( $I_{Э} \uparrow$ ), а выходное сопротивление транзистора (между коллектором и эмиттером) уменьшается ( $R_{ВыхТр} \downarrow$ ), а следовательно уменьшается и падение напряжения на выходе транзистора ( $I_{Э} R_{ВыхТр} = U_{Вых} \downarrow$ ).

2. При уменьшении входного напряжения ( $U_{ВХ} \downarrow$ ) ширина  $p-n$  перехода между коллектором и базой увеличивается, в результате чего ток в цепи эмиттера уменьшается ( $I_{Э} \downarrow$ , см. рис. 1.3), а выходное сопротивление транзистора (между коллектором и эмиттером) увеличивается ( $R_{ВыхТр} \uparrow$ ), следовательно увеличивается и падение напряжения на выходе транзистора ( $I_{Э} R_{ВыхТр} = U_{Вых} \uparrow$ ).

Усилительный каскад с общим эмиттером сдвигает фазу на  $180^\circ$ .

Изменения выходного напряжения, при изменении входного от минимального до максимального, определяется **статической нагрузочной характеристикой**:

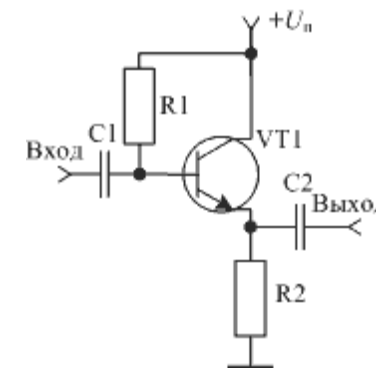
$$E_K = U_{КЭ} + R_K I_K \quad \text{или} \quad U_{КЭ} = E_K - R_K I_K$$



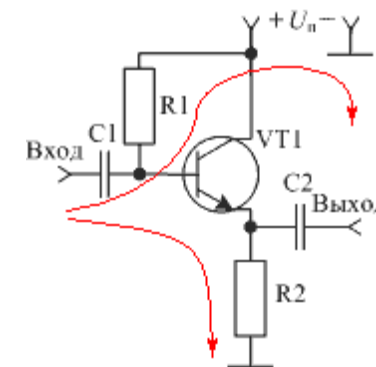
## Схемы включения биполярного транзистора

Схемы «с **общим коллектором**» означает - вывод коллектора является общим для входной и выходной цепи.

- Схема с **общим коллектором** не инвертирует сигнал и не усиливает его по напряжению, поэтому она часто называется эмиттерным повторителем.
- Основным преимуществом усилителя с **общим коллектором** является его большое входное сопротивление, поэтому схема с общим коллектором обычно применяется на низких частотах. В данной схеме резистор R2 одновременно является резистором нагрузки и элементом коллекторной стабилизации.
- Схема каскада с **общим коллектором** и эмиттерной стабилизацией обладает лучшими характеристиками по стабильности параметров. В ней глубина обратной связи по постоянному току приближается к 100%.
- При номинале сопротивления резистора 1 кОм и  $h_{21э}$ , равным 100, входное сопротивление транзистора будет равно 100 кОм! Но следует учитывать влияние сопротивления цепи смещения, так как по нему тоже протекает входной ток.



$$R_{вхОК} = (r_{э} + R_{э})(h_{21э} + 1)$$



Пути протекания входного тока в схеме с общим коллектором

# Биполярный транзистор в ключевом режиме

- Биполярный транзистор может работать в двух принципиально разных режимах – в режиме усилителя и в режиме ключа. Основная задача любого транзисторного ключа состоит в коммутации мощной нагрузки по команде маломощного сигнала.

- Команда на открытие БТ подается управляющим напряжением  $U_{БЭ}$ , которое подается на выводы базы и эмиттера через токоограничивающий резистор  $R_B$ . Величина  $U_{БЭ}$  должна быть не меньше 0,6 В, иначе эмиттерный переход полностью не откроется, что вызовет дополнительные потери энергии в полупроводниковом элементе.

- Все расчеты сводятся к определению сопротивлений резистора коллектора  $R_K$  и базы  $R_B$ .

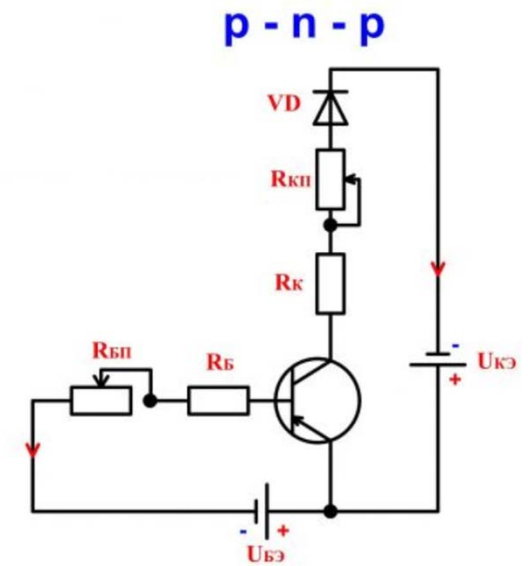
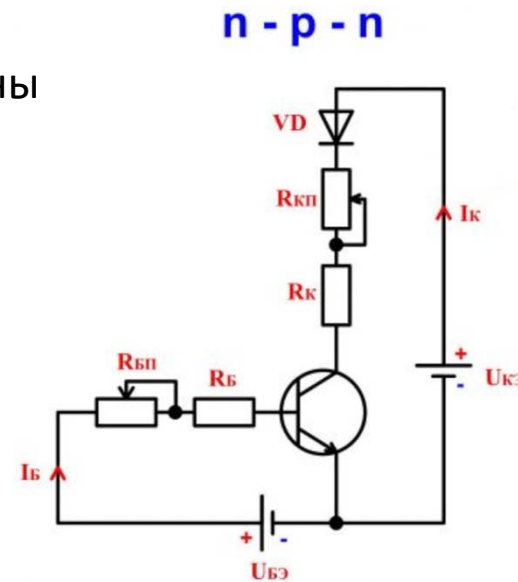
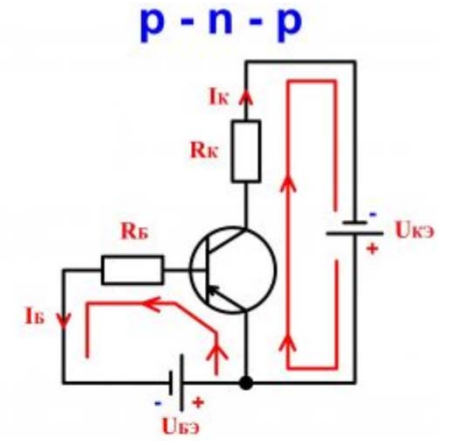
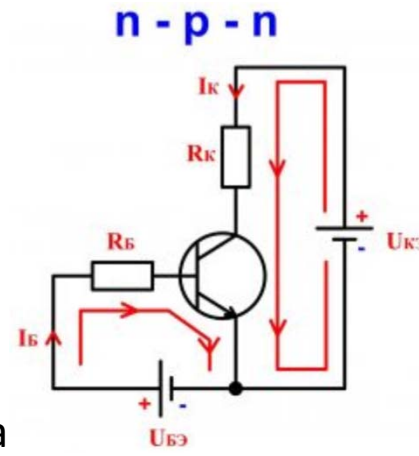
Резистор  $R_K$ , который предназначен для ограничения величины тока  $I_K$ , протекающего через светодиод  $VD$ .  $R_K$  находится по закону Ома:

$$R_K = \frac{\Delta U_{R_K}}{I_K}$$

Сопротивление резистора в цепи базы  $R_B$ :

$$R_B = \frac{\Delta U_{R_B}}{I_B}$$

$$\Delta U_{R_B} = U_{БЭ} - \Delta U_{БЭ} \quad I_B = \frac{I_K}{\beta}$$



# Биполярный транзистор в ключевом режиме

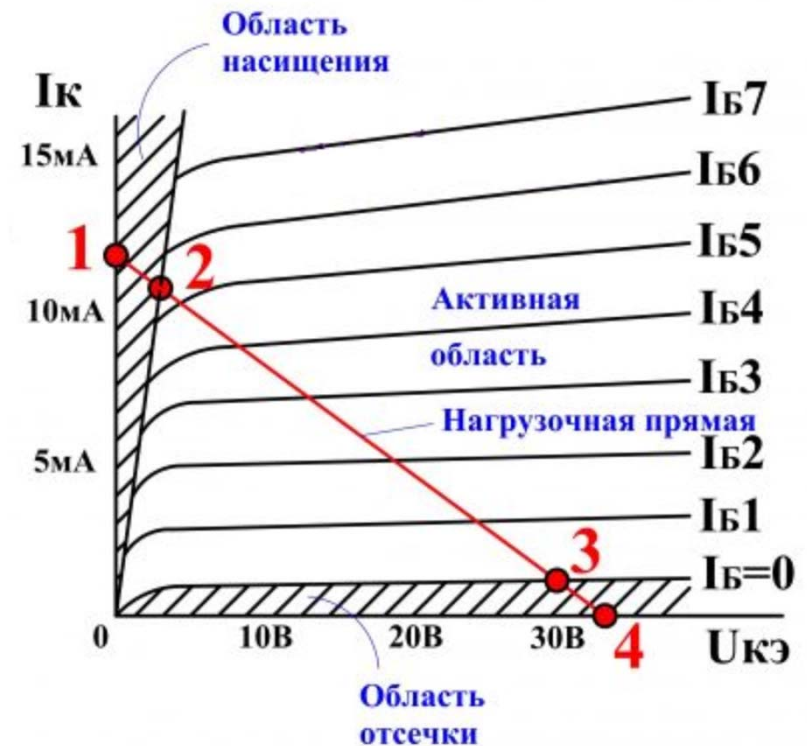
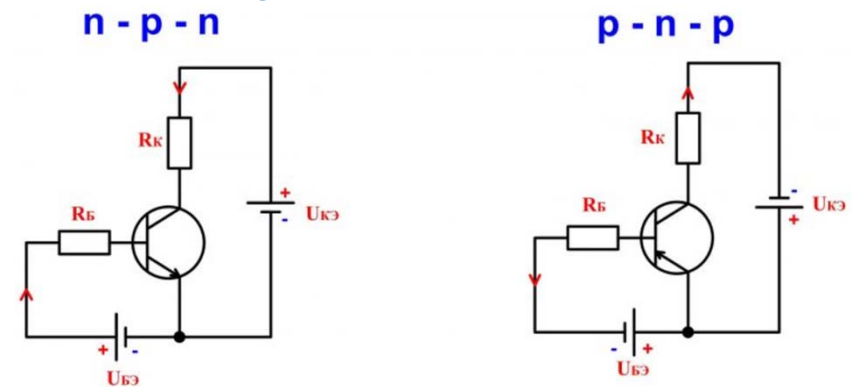
Как и электрический ключ, транзисторный ключ может (и должен) находиться только в одном из двух состояний – включенном (открытом) и выключенном (закрытом), что отображено на участках нагрузочной прямой.

На участке **3-4** БТ закрыт, а на его выводах потенциалы  $U_{кэ}$ . Коллекторный ток  $I_к$  близок к нулю. При этом ток в цепи базы  $I_к$  также отсутствует, собственно по этой причине БТ и закрыт. Область на входной статической характеристике, отвечающая закрытому состоянию называется **областью отсечки**.

Второе состояние – БТ полностью открыт, что показано на участке **1-2**. Как видно из характеристики, ток  $I_к$  имеет некое значение, которое зависит от величин  $U_{кэ}$  и  $R_к$ . В цепи база-эмиттер также протекает ток  $I_б$ , величина которого достаточна для полного открытия биполярного транзистора.

Такая рабочая область БТ, в которой он полностью открыт, называется **областью насыщения**.

В области, где ключ занимает среднее положение между открыто-закрыто называется **активной областью**.



## Схема однокаскадного усилителя

$E_c$ ,  $R_c$  и  $E_n$ ,  $R_{B1}$  — источники входного сигнала и питания транзистора с соответствующими внутренними сопротивлениями;

$U_{вх}$  — напряжение входного сигнала;

$R_{B1}$  и  $R_{B2}$  — резисторы делителя напряжения питания  $U_n$ , предназначенные для установки тока базы  $I_B$  транзистора (по постоянному току), т. е. рабочей точки (точки покоя) на линии нагрузки;

$R_g$  — резистор обратной отрицательной связи транзистора  $VT$  по постоянному току, подбором сопротивления которого обеспечивается температурная стабилизация режима усиления. Так, при увеличении температуры возрастают постоянные составляющие токов коллектора  $I_k$  эмиттера  $I_g$  и происходит падение напряжения  $R_g I_g$ .

В результате напряжение  $U_{pg}$  уменьшается, что вызывает уменьшение тока базы  $I_B$ , и, следовательно, тока  $I_k$ , стабилизируя его;

$C_g$  — конденсатор большой ёмкости, шунтирующий сопротивление резистора  $R_g$  по переменному току, что исключает ослабление усиливаемого сигнала по переменному току цепью обратной связи;

$R_k$  — нагрузочный резистор, сопротивление которого ограничивает ток коллектора  $I_k$  транзистора  $VT$ ;

$C_1$  и  $C_2$  — разделительные конденсаторы входной и выходной цепей, обеспечивающие гальваническую развязку усилителя по постоянному току.

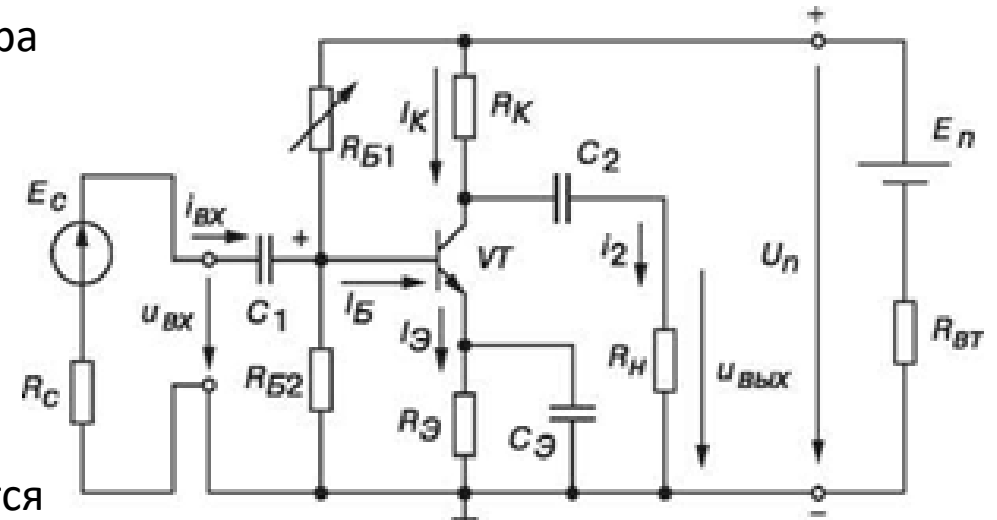


Рис. 3.5

## Схема однокаскадного усилителя

В режиме работы усилителя по *постоянному току* для получения наименьших нелинейных искажений усиливаемого сигнала рабочую точку *a* выбирают посередине рабочего участка *bc* линии нагрузки по постоянному току, описываемой уравнением

$I_{Kn} = (U_n - U_{Kn}) / R_k$ , где  $U_{Kn} = U_{Kэ} + R_{элэп}$

Линию нагрузки строят следующим образом. Из приведенного уравнения следует, что при  $I_{Kn} = 0$ ,  $U_{Kn} = U_n$ , а при  $U_{Kn} = 0$ ,  $I_{K.max} = U_n / R_k$ . Через две найденные точки проводят прямую (нагрузочную) линию. Задав ток базы в режиме покоя  $I_{Бп}$ , находят на пересечении линии нагрузки по постоянному току с выходной характеристикой транзистора при  $I_{б} = I_{Бп}$  точку покоя  $a(U_{Kn}, I_{Kn})$ .

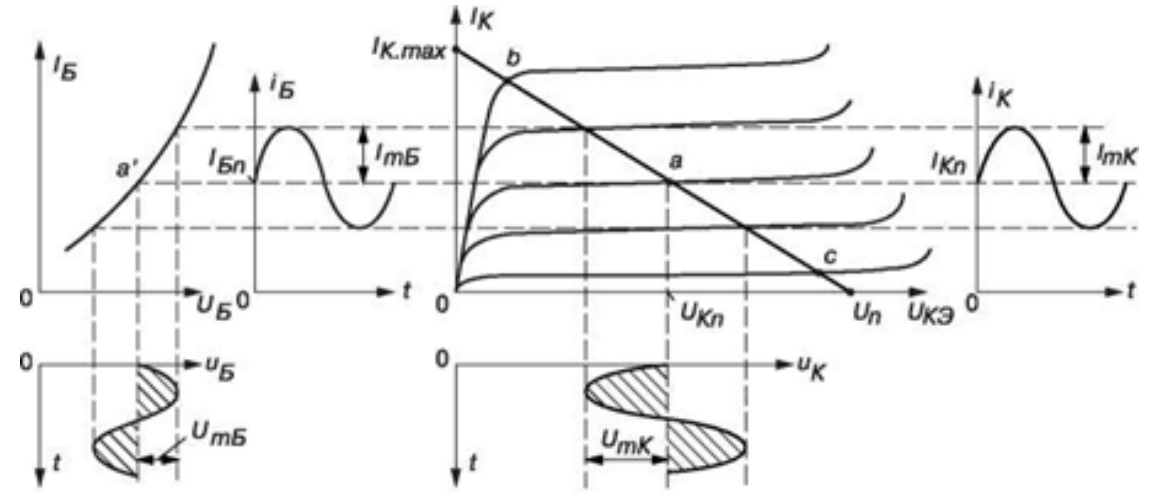


Рис. 3.7

## Мультивибратор

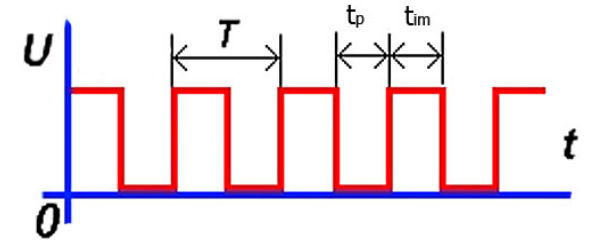
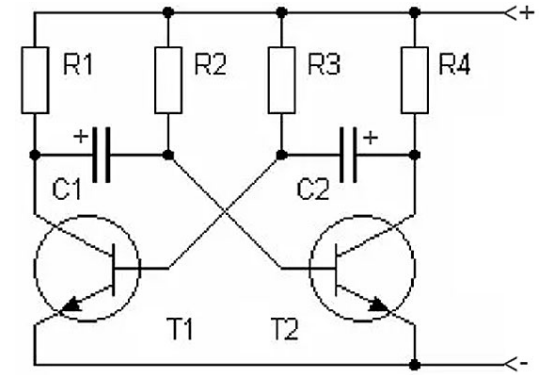
**Мультивибратор** — это генератор электрических колебаний. В переводе с латыни значит: «мульти» — много, «вибро» — колебание.

Генераторы делятся на три вида:

- автоколебательный;
- моностабильный;
- бистабильный.
- **Автоколебательный** или нестабильный. Непрерывно генерирует импульсы и ему не нужен внешний источник синхронизации.
- **Моностабильный**. Имеет одно устойчивое положение, а второе – неустойчивое, определяемое параметрами элементов. Устройство находится в состоянии покоя до тех пор, пока на него не поступит управляющий сигнал. Такие мультивибраторы получили название **одновибраторы** или **ждущие мультивибраторы**.
- **Бистабильный**. Эти устройства имеют два стабильных положения и переключаются из одного состояния в другое подачей внешнего сигнала - относятся к тригерам.

Работа схемы характеризуется несколькими величинами. Это:

- **Частота**. Единица измерения  $F$  — герц, Гц.
- **Амплитуда**. Вольт.
- **Длительность импульса**. Единица измерения секунды.
- **Скважность**. Отношение периода  $T$  к длительности импульса  $t$ .  $S=T/t_{im}$ .



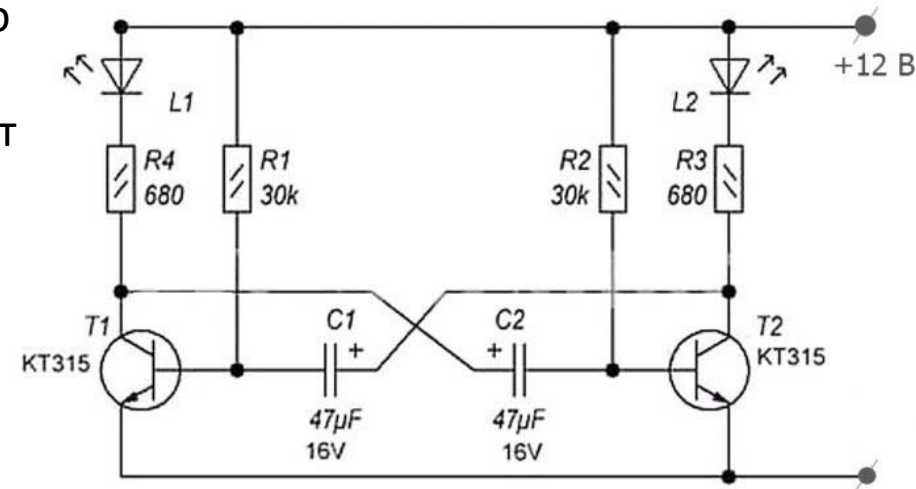


# Симметричный мультивибратор

1. В начальный период подачи питания транзисторы закрыты, а C1 и C2 полностью разряжены. Это должно привести к быстрому открыванию транзисторов T1 и T2 через L2-R3-C1- база T1 и L1-R4-C2- база T2. Но в реальности, параметры элементов имеют разброс. В какой-то момент один из транзисторов начнёт открываться чуть быстрее, допустим T2, что приводит к угнетению T1 и ещё более быстрому открыванию T2. с концом цикла мы имеем, что T1 закрыт, а T2 полностью открыт и насыщен. Светодиод L2 светится. Конденсатор C1 заряжен до напряжения питания. При заряженном C1, ток через резистор R1 прекращается. Напряжение на нём равно  $I_{BT2} \cdot R2$ , а на коллекторе T1 соответствует напряжению питания.

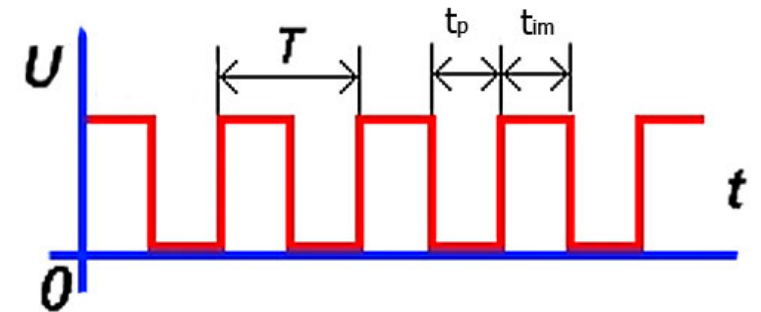
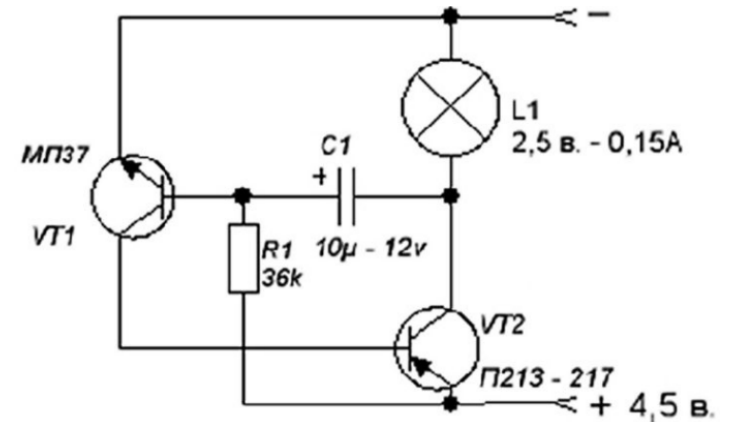
2. Напряжение на коллекторе T2 невелико. Заряженный конденсатор C2, начинает медленно разряжаться через открытый транзистор T2 и R3. Отрицательным напряжением на базе транзистор T1 он остаётся закрытым, до тех пор, пока C2 не начнёт перезаряжаться через R3 и напряжение базы T1 не достигнет порога его полного открывания 0,6 В.

3. T1 с ростом напряжения приоткрывается, и напряжение на его коллекторе снижается. Это вызывает начало запираения транзистора T2, с ростом напряжения на его коллекторе. При этом через C2 ещё больше открывается транзистор T1. Горит светодиод L1.



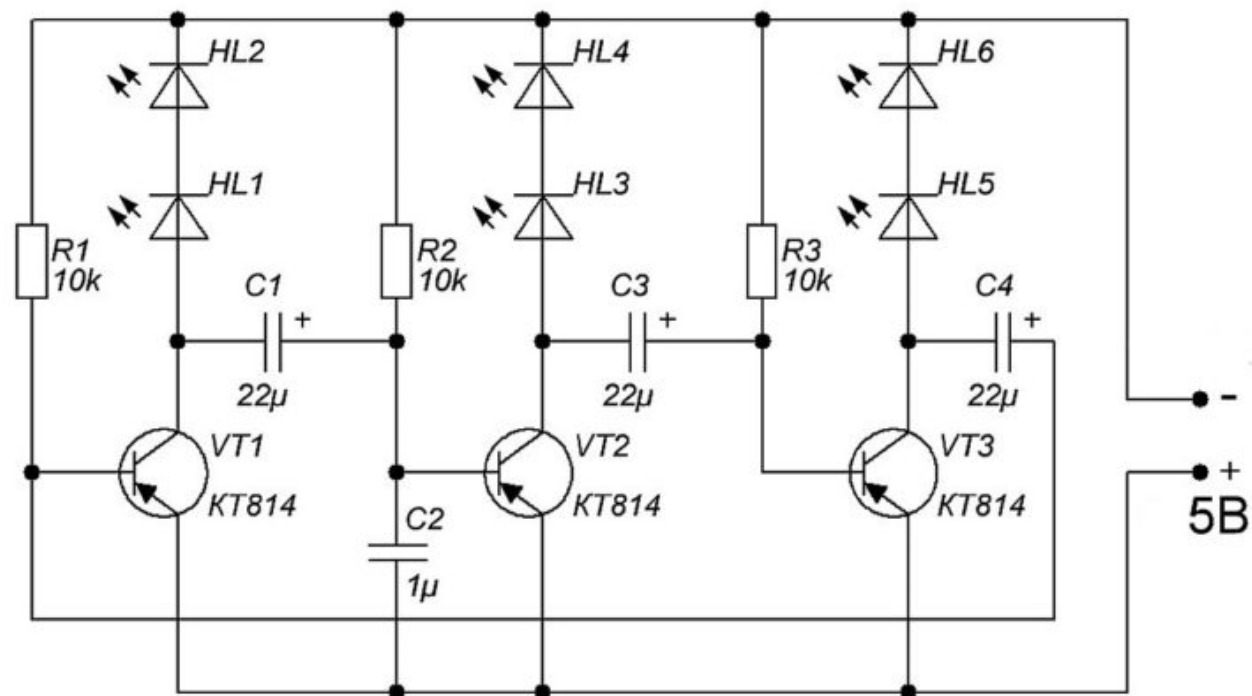
# Несимметричный мультивибратор

1. Перед подачей питания оба транзистора закрыты, конденсатор разряжен. Небольшой ток потечёт по цепи R1-C1-L1. По мере зарядки конденсатора транзистор T1 начнёт открываться, одновременно открывая T2. Напряжение на коллекторе T2 нарастает с увеличением его на базе T1. Что приводит к открытию транзисторов. Ток потечёт эмиттер-коллектор T2 и лампа L1.
2. Заряженный конденсатор начнёт разряжаться и затем заряжаться обратным зарядом. При росте отрицательного заряда на базе T1 он закроется и закроет T2. Тока проходящего через резистор R1 недостаточно для поддержания транзисторов открытыми. Потенциал на коллекторе VT2 станет падать, это падение через конденсатор передастся на базу VT1, и транзисторы закроются.



## Трёхфазный мультивибратор

Если к мультивибратору добавить ещё один каскад, тогда получим трёхфазный мультивибратор. Как видно из схемы, последний каскад связан с первым положительной обратной связью. Так схема понимает, что пора начинать новый цикл.

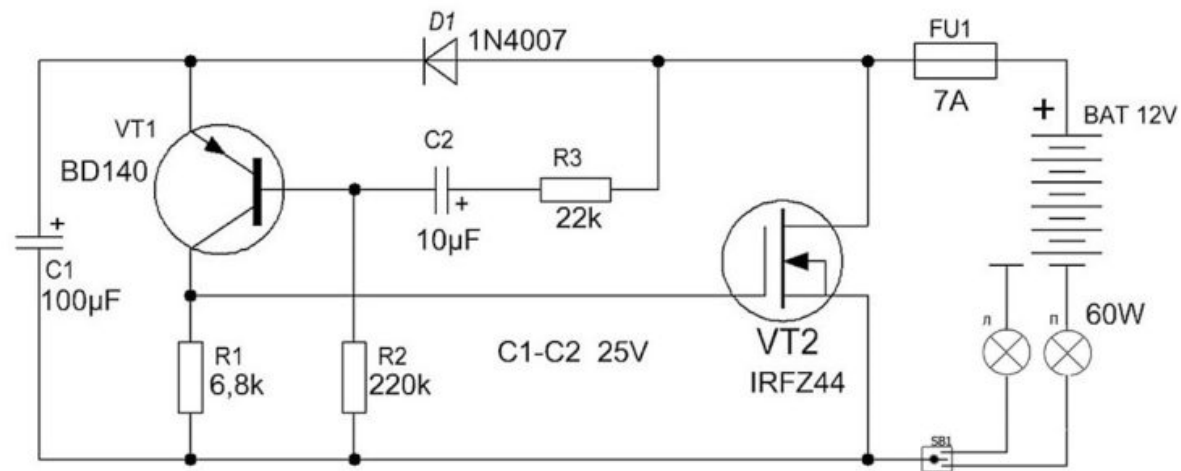


## Реле поворотов

Работать устройство начинает сразу после подачи напряжения при замыкании цепи левого или правого поворота. Мощности 60 Ватт вполне достаточно.

В начальный момент заряжается C1 и C2, затем открывается VT1 и VT2.

После того, как транзисторы открыты начинает разряжаться C2. И транзистор VT2 закрывается. После закрытия VT2 снова начинает заряжаться C2 и открывает VT2.



# Параметрические стабилизаторы

Схема – **параллельный параметрический стабилизатор** на стабилитроне, подключенный к входу **эмиттерного повторителя (ЭП)**. Напряжение на базе транзистора зафиксировано ( $U_б = U_{ст} = \text{const}$ ).

**Механизмы стабилизации:**

$$R_H \downarrow \Rightarrow U_H \downarrow \Rightarrow U_{бэ} \uparrow = U_{ст} - U_H \downarrow \Rightarrow I_б \uparrow \Rightarrow I_к \uparrow \Rightarrow I_э \uparrow \Rightarrow U_H \uparrow$$

$$U_{вх} \uparrow \Rightarrow U_{вх} \uparrow = U_{кэ} \uparrow + U_H (\text{const})$$

$U_H$  стабилизатора меньше напряжения  $U_{ст}$  на величину  $U_{бэ}$ :

$$U_H = U_{ст} - U_{бэ}, \text{ где } U_{бэ} \approx 0,6-0,7\text{В (для Si)}$$

Применение эмиттерного повторителя (усилителя тока) позволяет увеличить максимальный выходной ток стабилизатора в  $\beta$  раз.

Если этого недостаточно, используют составной транзистор с большим  $\beta$ .

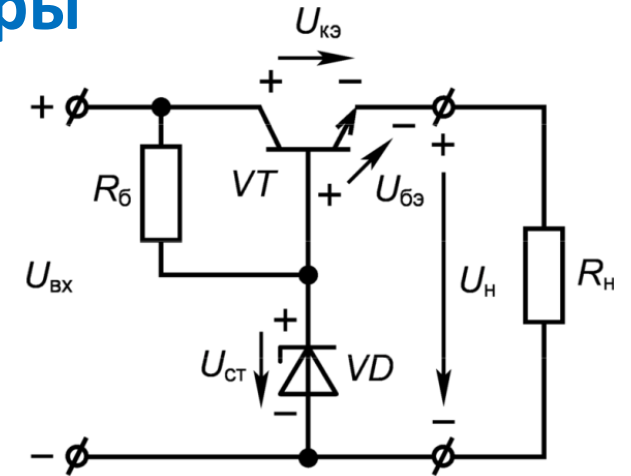


Схема стабилизатора на биполярном транзисторе

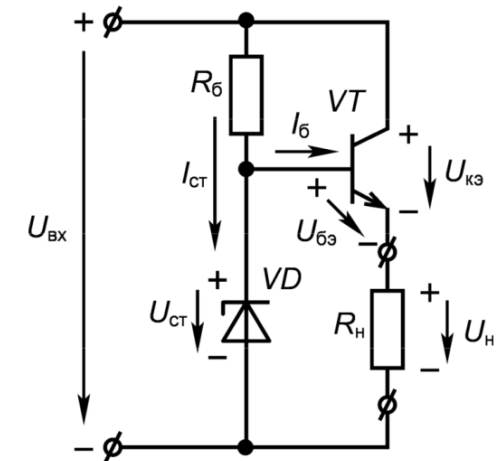


Схема в более привычном виде (эмиттерный повторитель)

# Компенсационные стабилизаторы

## Принцип работы.

Напряжение на выходе стабилизатора или некоторая его часть постоянно сравнивается с эталонным напряжением. В зависимости от их соотношения усилителем постоянного тока (У) вырабатывается управляющий сигнал для регулирующего элемента (РЭ), изменяющий режим его работы (например, его сопротивление) таким образом, чтобы напряжение на выходе стабилизатора оставалось практически постоянным.

## Назначение элементов:

$VT_1$  – регулирующий элемент с общим коллектором (эмиттерный повторитель) ;

$VT_2$  – усилитель (усилительный элемент);

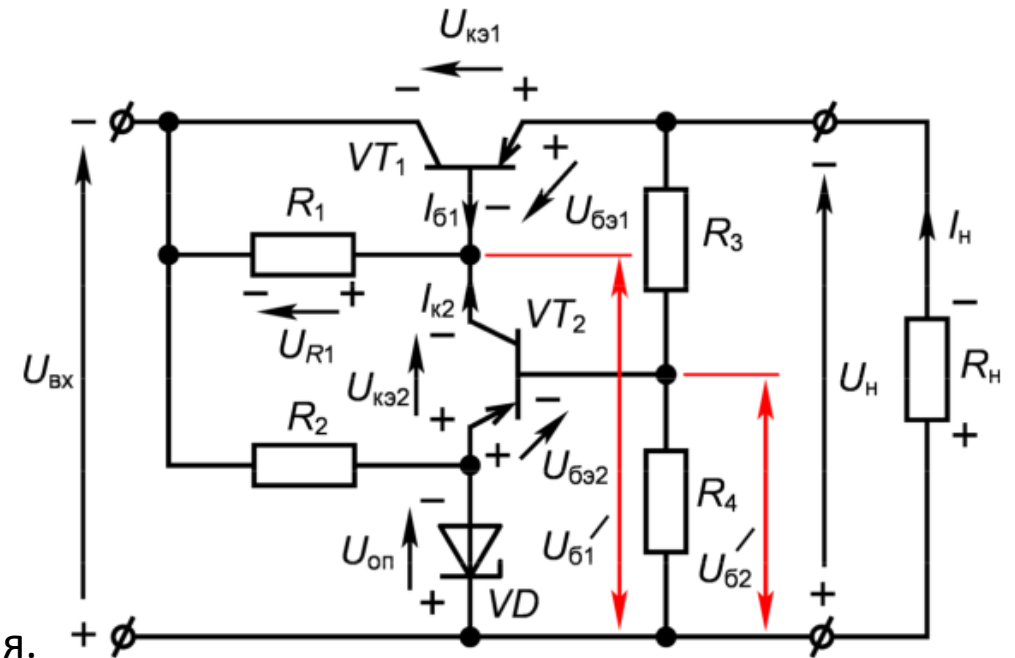
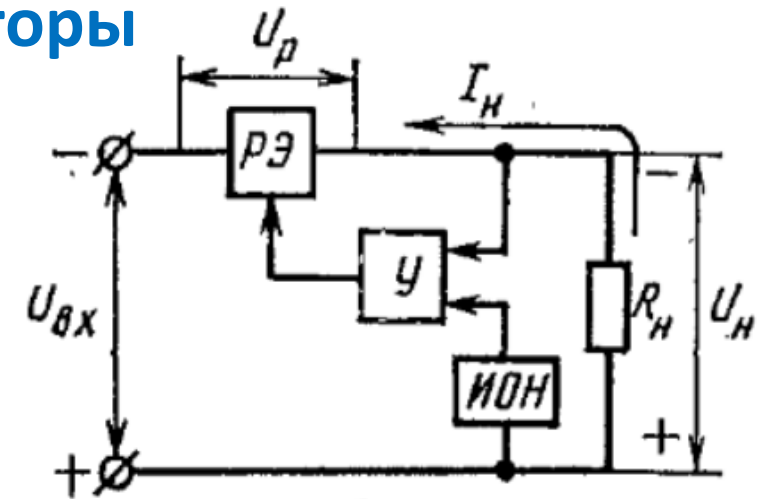
$VD$  – ИОН на стабилитроне;

$R_1$  – задает рабочую точку  $VT_1$ ;

$R_2$  – служит для вывода стабилитрона на рабочий участок ВАХ, если ток  $I_{э2}$  мал;

$R_3, R_4$  – делитель напряжения, формирует сигнал обратной связи:

Стабилизирующее действие схемы обусловлено наличием в ней глубокой отрицательной ОС по приращениям выходного напряжения.



# Компенсационные стабилизаторы

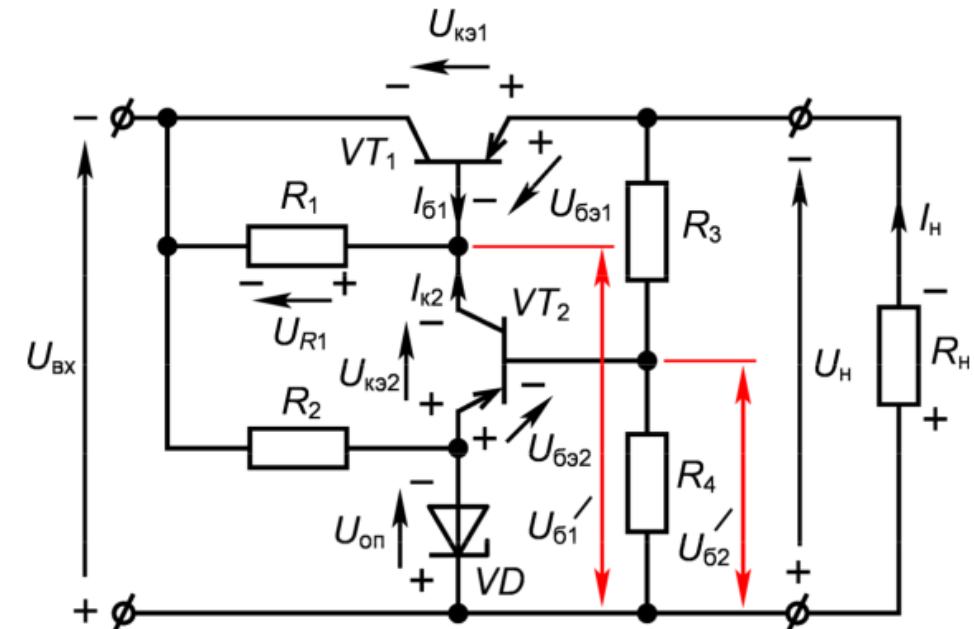
## Принцип работы.

Пусть под действием уменьшения  $U_{вх}$  напряжение  $U_{н}$  стало меньше номинального (в абсолютных значениях). Снижение  $U_{н}$  вызывает уменьшение напряжения на выходе делителя  $U_{\delta 2}$  и напряжения  $U_{\delta 2'}$ . В результате уменьшаются токи  $I_{\delta 2}$ ,  $I_{к2}$  и напряжение  $U_{R1}$ , напряжение  $U_{\delta 1}$  возрастает. Вследствие увеличения  $U_{\delta 1}$ , возрастает напряжение  $U_{\delta 1'}$ , еще больше приоткрывая транзистор  $VT1$ , повышая тем самым почти до прежней величины напряжение  $U_{н}$ . Подобно рассмотренному осуществляется компенсация изменения напряжения  $U_{н}$  при увеличении  $U_{вх}$ , а также при изменениях тока  $I_{н}$ .

$$\begin{aligned}
 U_{н} \downarrow &\Rightarrow U_{\delta 2} \downarrow = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot U_{н} \downarrow \Rightarrow U_{\delta 2'} \downarrow = U_{\delta 2} \downarrow - U_{оп} (const) \Rightarrow I_{\delta 2} \downarrow \Rightarrow \\
 &\Rightarrow I_{к2} \downarrow = I_{\delta 2} \downarrow \cdot \beta_2 \Rightarrow U_{R1} \downarrow = (I_{\delta 1} + I_{к2} \downarrow) \cdot R_1 \Rightarrow U_{\delta 1} \uparrow = U_{вх} - U_{R1} \downarrow \Rightarrow \\
 &\Rightarrow U_{\delta 1'} \uparrow = U_{\delta 1} \uparrow - U_{н} \Rightarrow I_{\delta 1} \uparrow \Rightarrow I_{\delta 1'} \uparrow = I_{\delta 1} \uparrow \cdot (\beta_1 + 1) \Rightarrow U_{н} \uparrow = I_{\delta 1'} \uparrow \cdot R_{н} \Rightarrow \\
 &\Rightarrow U_{н} = const
 \end{aligned}$$

$K_{ст} \approx$  несколько сотен

$R_{вых} \approx$  десятые – сотые доли Ом



# Мостовая схема

## Принцип работы.

В момент времени  $t = 0$  по сигналу от СУ включаются транзисторы  $VT1$  и  $VT3$ . Нагрузка включается параллельно к источнику  $E$ .

Путь тока:  $+E \rightarrow VT1 \rightarrow R_n \rightarrow VT3 \rightarrow -E$ .

Полярность на  $R_n$  без скобок.

В момент  $t_1 = T/2$  транзисторы  $VT1$  и  $VT3$  закрываются, а  $VT2$  и  $VT4$  открываются, полярность на  $R_n$  скачком изменяется на обратную.

Путь тока:  $+E \rightarrow VT2 \rightarrow R_n \rightarrow VT4 \rightarrow -E$

Из-за инерционности транзисторов возможна ситуация, при которой верхний и нижний транзисторы одного из плечей моста будут одновременно открыты (один еще не закрылся, а другой уже открылся).

**Решение:** создание паузы между импульсами. Для формирования паузы один из транзисторов выключают чуть раньше, чем  $T/2$ . В таком случае напряжение будет с паузой.

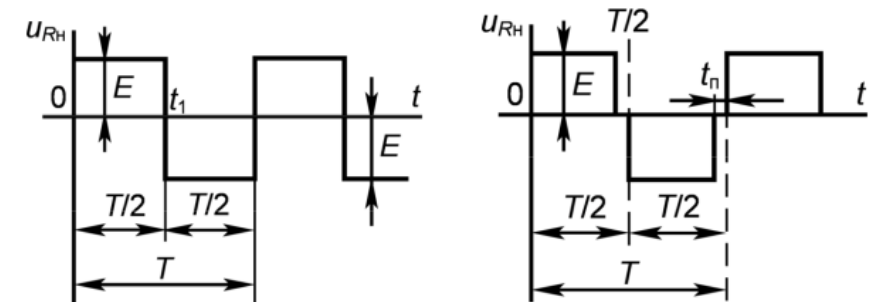
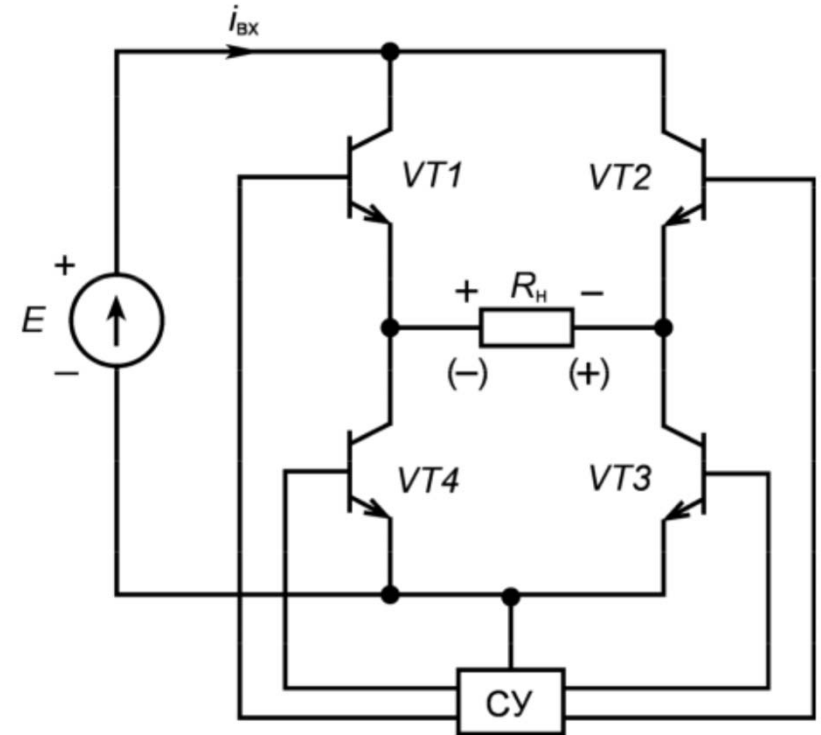


Диаграмма напряжения на нагрузке,  
 $T$  – период работы инвертора,  
 $t_p$  – время паузы (мертвое время)



# Полумостовая схема

## Принцип работы.

Конденсаторы  $C1$  и  $C2$  создают двухполярный источник питания для инвертора с напряжением:  $U_{C1} = U_{C2} = E/2$ .

Поэтому в данной схеме напряжение на нагрузке будет в 2 раза меньше, чем в мостовой схеме.

В момент времени  $t = 0$  по сигналу от СУ включается транзистор  $VT1$ . Нагрузка включается параллельно к конденсатору  $C1$ , на нагрузке:

$$U_{RH} = U_{C1} = E/2 .$$

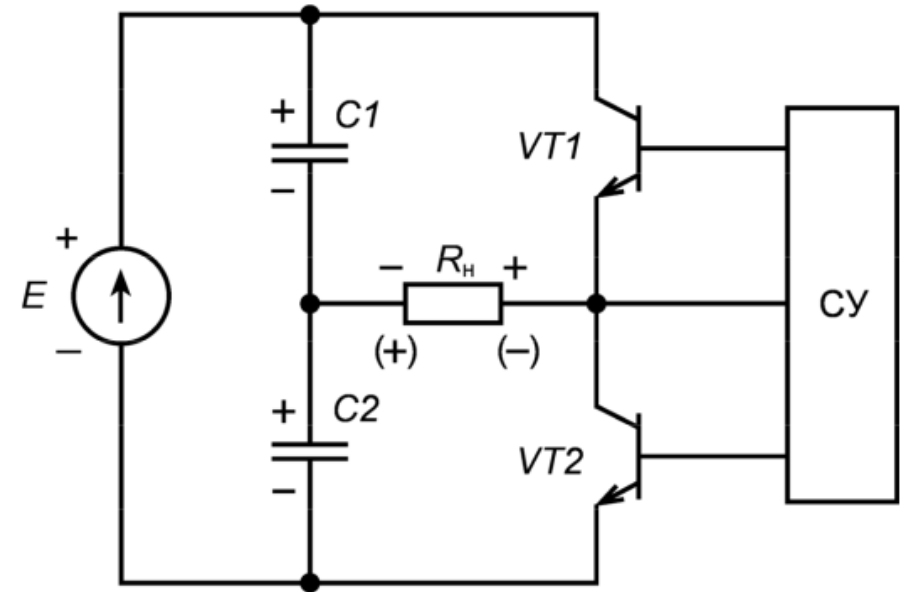
В момент  $t1 = T/2$  транзистор  $VT1$  закрывается, а  $VT2$  открывается. Нагрузка включается параллельно к конденсатору  $C2$ :

$$U_{RH} = U_{C2} = E/2 .$$

Полярность на  $R_H$  скачком изменяется на обратную.

Полярность на  $R_H$  без скобок.

Выбор конденсаторов осуществляется исходя из допустимой пульсации на них.



СУ – схема управления

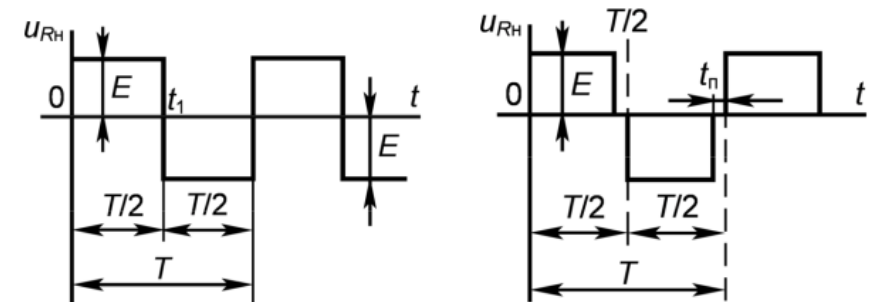


Диаграмма напряжения на нагрузке,  
 $T$  – период работы инвертора,  
 $tп$  – время паузы (мертвое время)

# Схема со средней точкой трансформатора

## Принцип работы.

Транзисторы  $VT1$  и  $VT2$  работают в противофазе.

В момент времени  $t = 0$  по сигналу от  $CY$  включается транзистор  $VT1$  и к полуобмотке  $W11$  прикладывается напряжение  $E$  с полярностью без скобок. В точке полуобмотки  $W11$  будет «-», следовательно во всех точках трансформатора  $TV$  будет знак «-».

Путь тока:  $+E \rightarrow W11 \rightarrow VT1 \rightarrow -E$ .

Ток течет через  $W11$  и, соответственно, трансформированный ток протекает через нагрузку. Полярность на  $R_n$  без скобок.

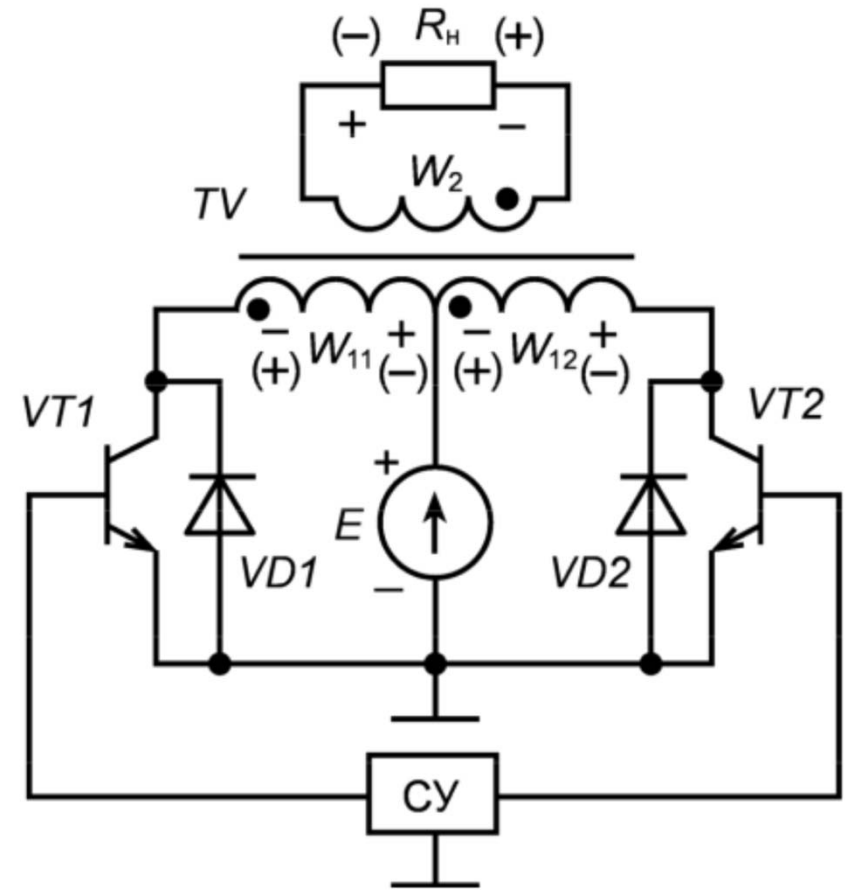
В момент  $t_1 = T/2$  транзистор  $VT1$  закрывается, а  $VT2$  открывается.

Полуобмотка  $W12$  подключается к источнику  $E$ . Полярность на всех обмотках трансформатора скачком меняется на обратную (полярность в скобках).

Путь тока:  $+E \rightarrow W12 \rightarrow VT2 \rightarrow -E$ .

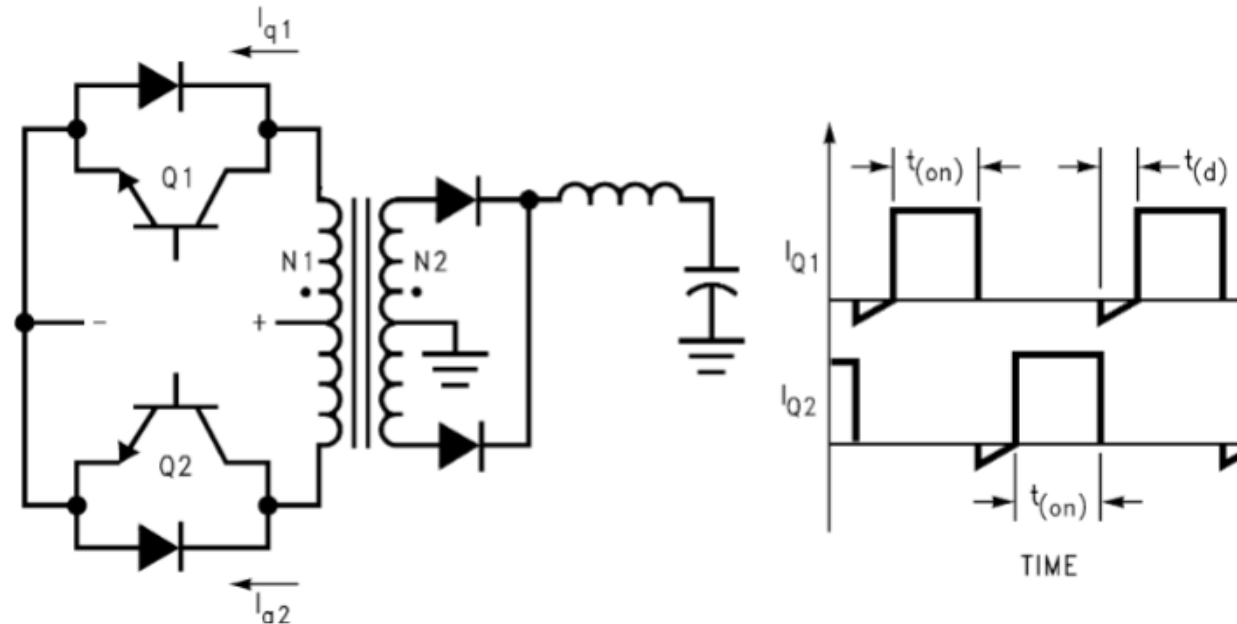
Ток течет через  $W12$  и, соответственно, трансформированный течет по  $W2$  и через  $R_n$ .

Полярность на  $R_n$  в скобках.



# Двухтактный преобразователь со средней точкой (Push-Pull converter)

Схема содержит два транзисторных ключа, которые работают в противотакте и по очереди подключают к источнику питания соответствующую половину первичной обмотки. Если включен транзистор VT1, то «плюс» источника питания приложен к концу одной полуобмотки трансформатора, а если открыт транзистор VT2 — к началу другой. Особенность этой схемы заключается в том, что к ключу, находящемуся в замкнутом состоянии, прикладывается сумма напряжений двух полуобмоток, т. е. удвоенное напряжение источника питания. При симметричном режиме работы инвертора сердечник трансформатора перемагничивается по полной петле кривой намагничивания от  $+V_r$  до  $-V_r$ . В результате в сердечнике трансформатора создается переменный магнитный поток, который наводит во вторичных полуобмотках переменное напряжение прямоугольной формы.



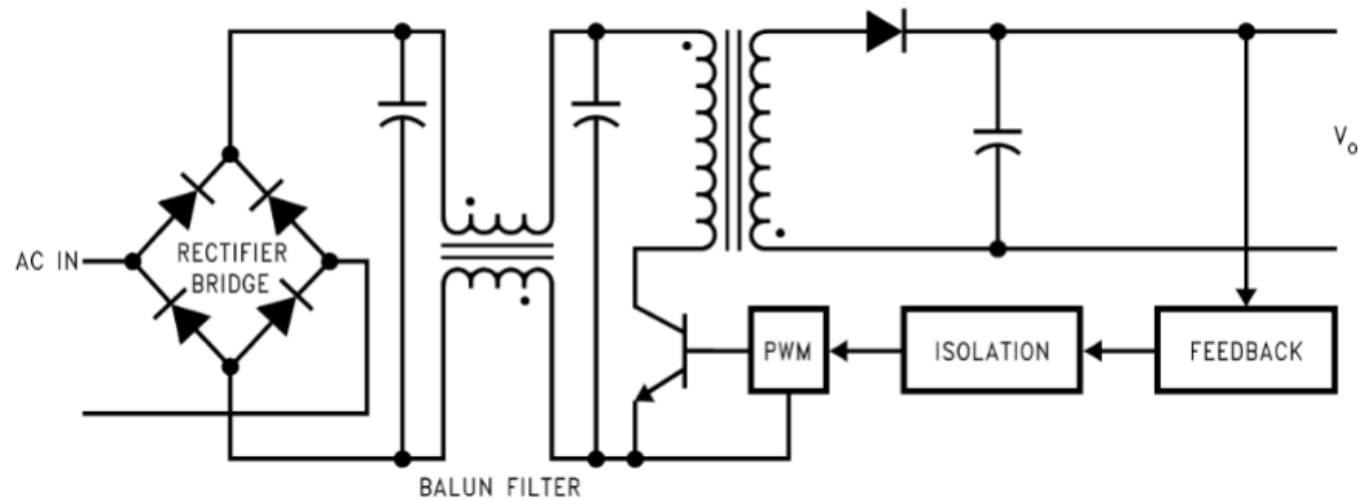
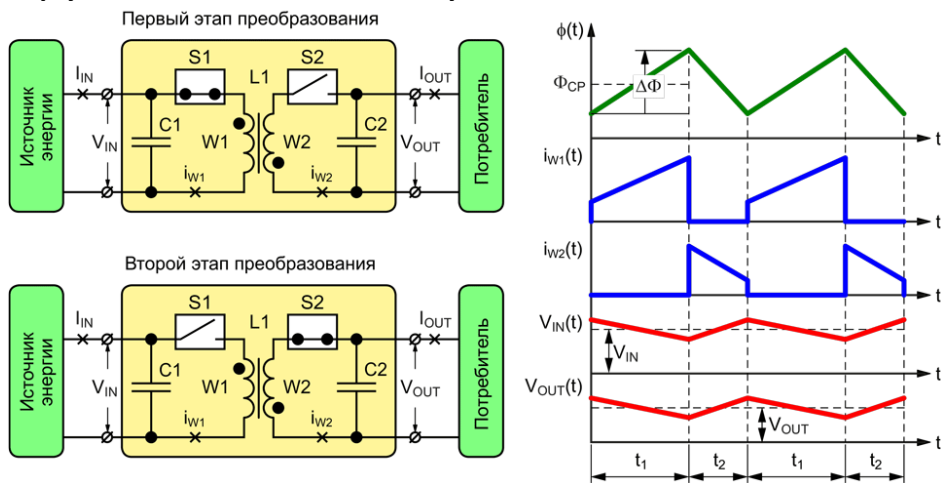
# Источник питания на базе обратноходового преобразователя

Принцип работы обратноходового преобразователя состоит в следующем. Ключевой транзистор, управляемый ШИМ-контроллером, коммутирует первичную обмотку трансформатора к источнику питания. Первичная обмотка обратноходового трансформатора фактически представляет собой дроссель, поэтому после коммутации ток через неё линейно растёт. Энергия накапливается в магнитопроводе в соответствии с формулой для энергии дросселя:

$$W = \frac{L I^2}{2} \quad \text{где: } L \text{ – индуктивность первичной обмотки трансформатора;}$$

$I$  – ток через первичную обмотку.

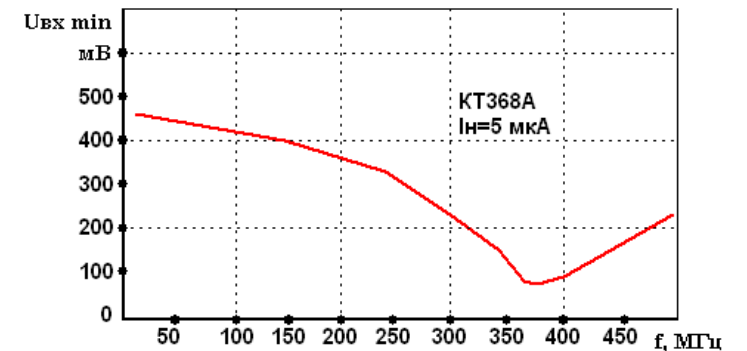
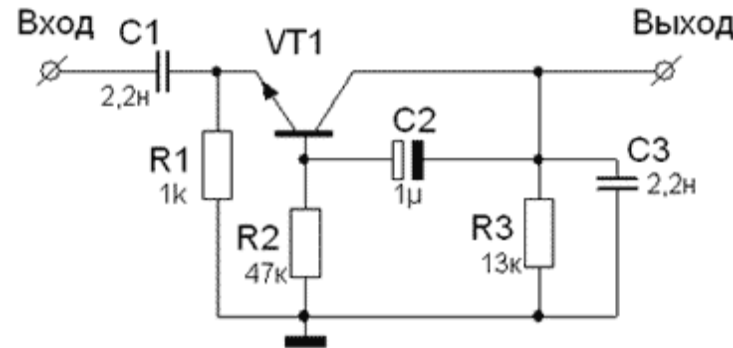
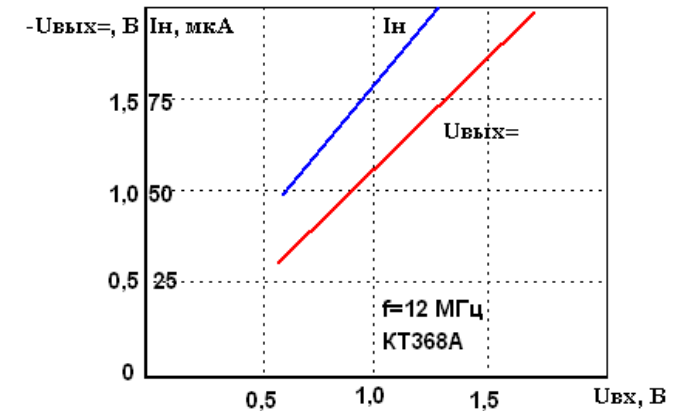
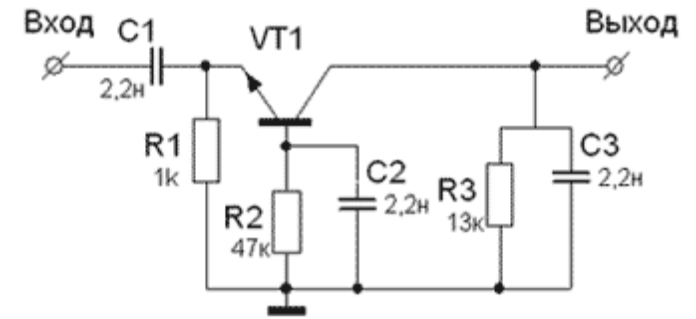
К выходному диоду приложено запирающее напряжение и ток во вторичной обмотке не протекает. В момент, когда транзистор закрывается, полярность на обмотках в соответствии с законом самоиндукции изменяется на противоположную. Диод открывается, ток начинает протекать через вторичную обмотку трансформатора, и энергия, запасенная в магнитопроводе, переходит в нагрузку. И это при закрытом ключе. Далее процесс повторяется. Выходной конденсатор фильтра является энергетическим буфером, поддерживающим ток в нагрузке в моменты паузы.



# Детекторы амплитудно-модулированных сигналов

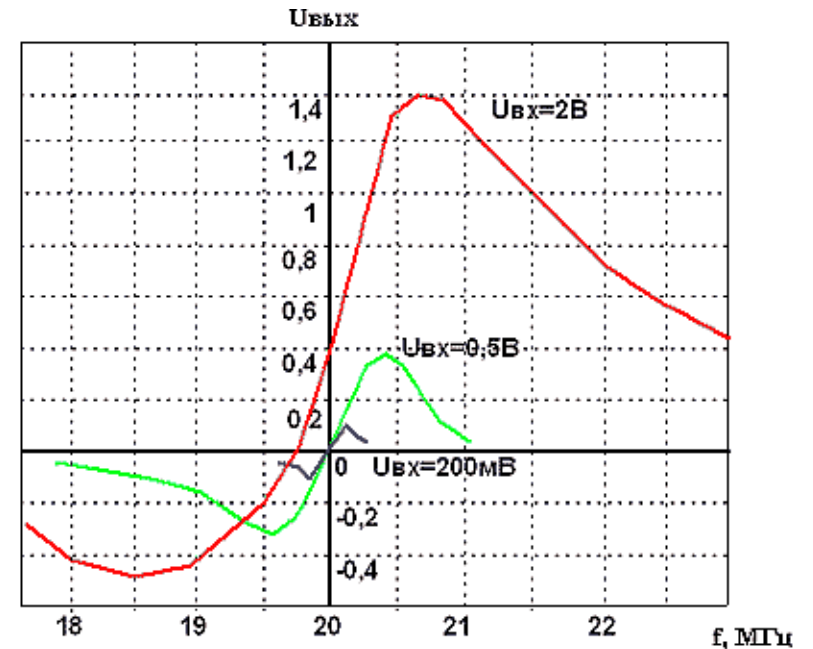
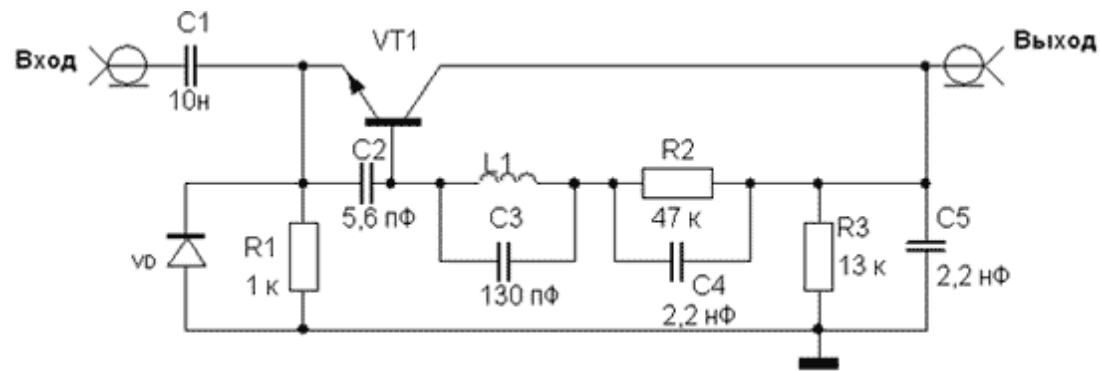
Входной амплитудно-модулированный сигнал через разделительный конденсатор  $C1$  поступает на эмиттер транзистора  $VT$ , который через резистор  $R1$  соединен с общей шиной. В базовую цепь транзистора включены резистор  $R2$  и конденсатор  $C2$ , являющийся блокировочным по частоте входного сигнала. В коллекторную цепь транзистора включены нагрузочные резистор  $R3$  и конденсатор  $C3$ . Таким образом, в схеме рис.1 по входному сигналу имеем каскад с общей базой.

Порог детектирования  $U_{вх\ min}$  для различных типов кремниевых транзисторов колеблется в пределах 0,4...0,48 В (при токе нагрузки 5 мкА), а также зависит от частоты входного сигнала. Зависимость минимального напряжения входного сигнала  $U_{вх\ min}$  для транзистора КТ368А при  $I_H=5\ \mu\text{кА}$



## Детектор частотно-модулированных сигналов

Частотный детектор представляет собой транзисторный каскад с общей базой, на эмиттер которого подается входной высокочастотный сигнал через разделительный конденсатор C1. В эмиттерную цепь включены резистор смещения R1 и ограничительный диод VD (можно установить два параллельно встречно включенных диода). В базовую цепь транзистора включен параллельный колебательный контур L1C3, настроенный на частоту входного высокочастотного сигнала, а в коллекторную цепь - резистор нагрузки R3 и фильтрующий высокочастотный сигнал конденсатор C5. Смещение на базе транзистора осуществляется с помощью резистора R2 и параллельно включенного ему конденсатора C4. Цепочка R2C4 может быть подключена к коллектору, как показано на рис.1 или к общей шине. Однако в первом случае осуществляется отрицательная обратная связь по постоянному току и огибающей ЧМ-сигнала, что уменьшает нелинейные искажения и увеличивает стабильность детекторной характеристики.



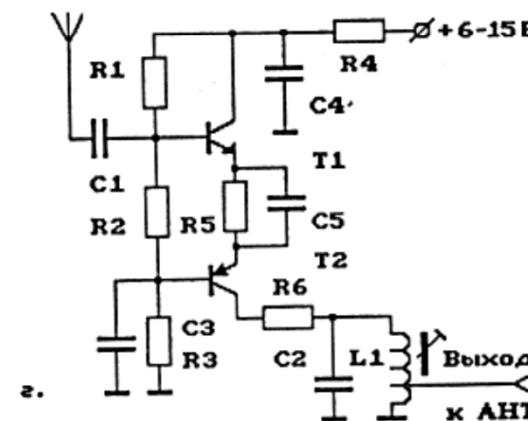
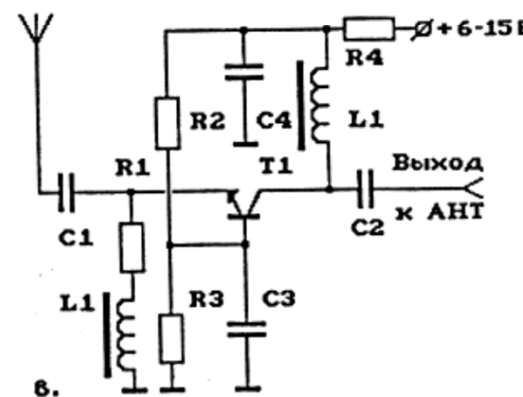
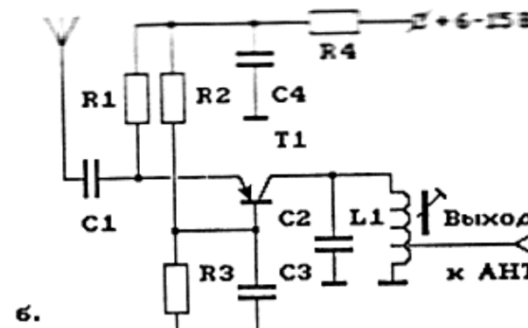
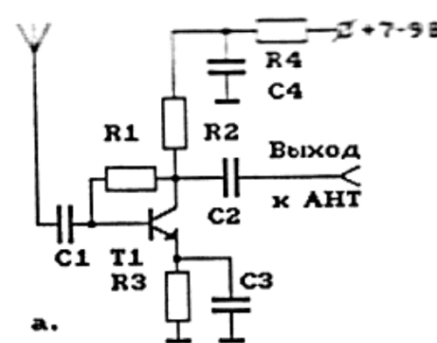
# Усилители высокой частоты (УВЧ) для приемников

На рис а приведена **схема широкополосного УВЧ** на одном транзисторе, включенном **по схеме с общим эмиттером (ОЭ)**.  $R1=51к$ ,  $R2=470$ ,  $R3=100$ ,  $R4=30-100$ ;  $C1=10-20$ ,  $C2=10-50$ ,  $C3=10-20$ ,  $C4=500-3н$ ;  $T1$  - ВЧ-транзисторы.

На рис б приведена **схема широкополосного усилителя высокой частоты (УВЧ)** на одном транзисторе, включенном **по схеме с общей базой**. В коллекторной цепи (нагрузка) включен LC-контур.  $R1=1к$ ,  $R2=10к$ ,  $R3=15к$ ,  $R4=51$  (для 3В-5В).  $R4=500-3к$  (для 6В-15В);  $C1=10-20$ ,  $C2=10-20$ ,  $C3=1н$ ,  $C4=1н-3н$ ;  $T1$  - ВЧ-транзисторы.

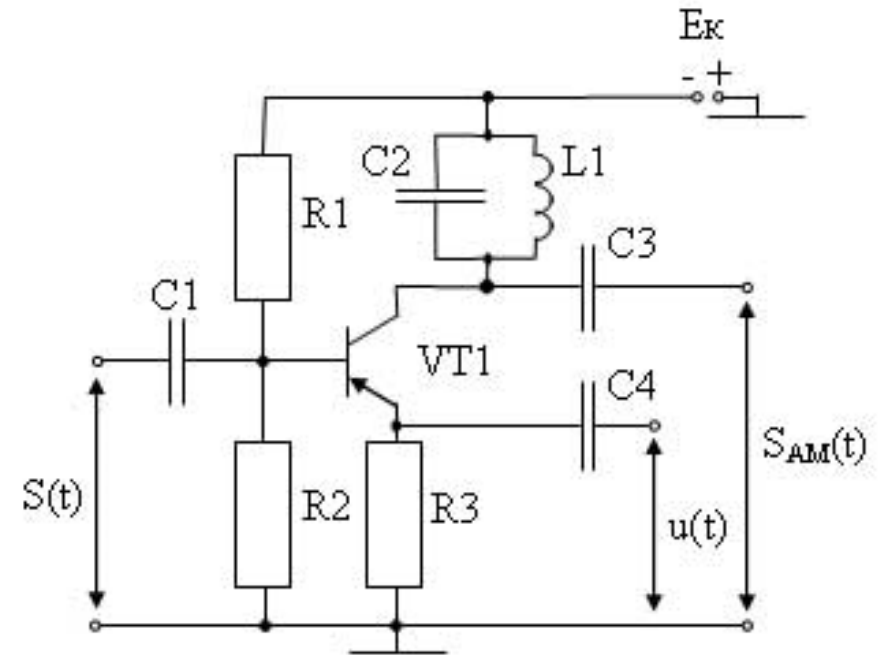
На рис в приведена еще одна **схема широкополосного УВЧ на одном транзисторе**, включенном **по схеме с общей базой**. В коллекторной цепи включен ВЧ-дрессель.  $R1=1к$ ,  $R2=33к$ ,  $R3=20к$ ,  $R4=2к$  (для 6В);  $C1=1н$ ,  $C2=1н$ ,  $C3=10н$ ,  $C4=10н-33н$ ;  $T1$  - ВЧ-транзисторы.

На рис г схемы УВЧ усилитель с применением **многотранзисторных схем** каскодного усилителя ОК-ОБ, позволяющие получить **большее значение коэффициента усиления**.



## Амплитудный модулятор на транзисторе

В модуляторе в качестве нелинейного элемента используется транзистор (VT), включенный по схеме с общим эмиттером. Нагрузкой транзистора является колебательный контур C2 L1, который используется в качестве полосового фильтра и настраивается на частоту первой гармоники несущего колебания  $\omega_0$ . Также модулятор содержит делитель напряжения R1 R2 подающий напряжение смещения для выбора положения рабочей точки транзистора, резистор R3 обеспечивающий температурную стабилизацию рабочей точки, разделительные конденсаторы C1, C3, C4 разделяющие ток питания от тока сигнала. Модулирующий сигнал подается на эмиттер транзистора. Несущее колебание вместе с напряжением смещения поступают на базу VT. Модулированный сигнал снимается с коллектора.





**Спасибо за внимание**

ЧУ ПО «Социально-технологический колледж»

Преподаватель: Борисов Алексей Альбертович