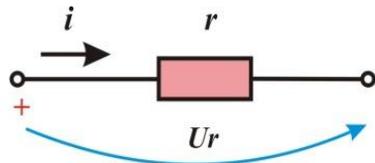
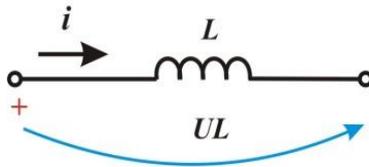


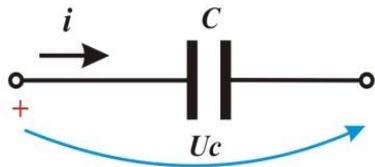
# «Электротехнические» элементы цепей



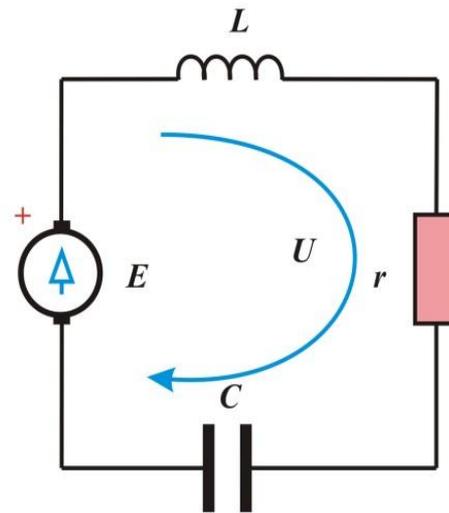
а)  $r$  - элемент резистора сопротивления



б)  $L$  - элемент катушки индуктивности

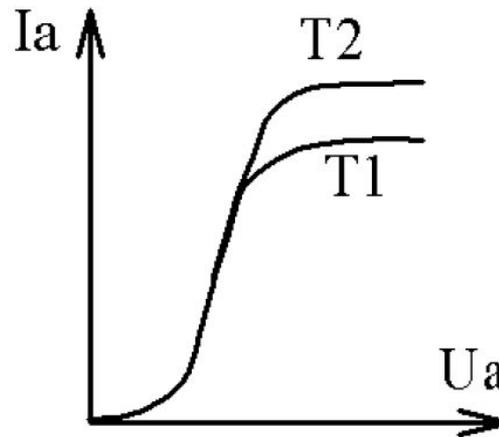
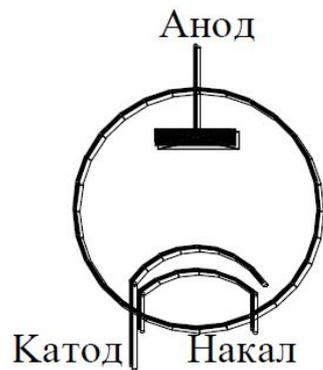


в)  $C$  - элемент ёмкости конденсатора



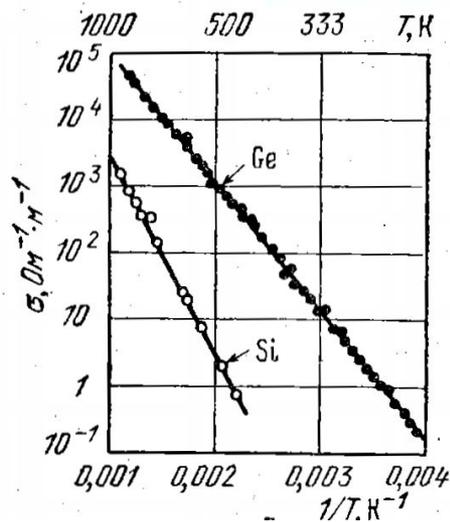
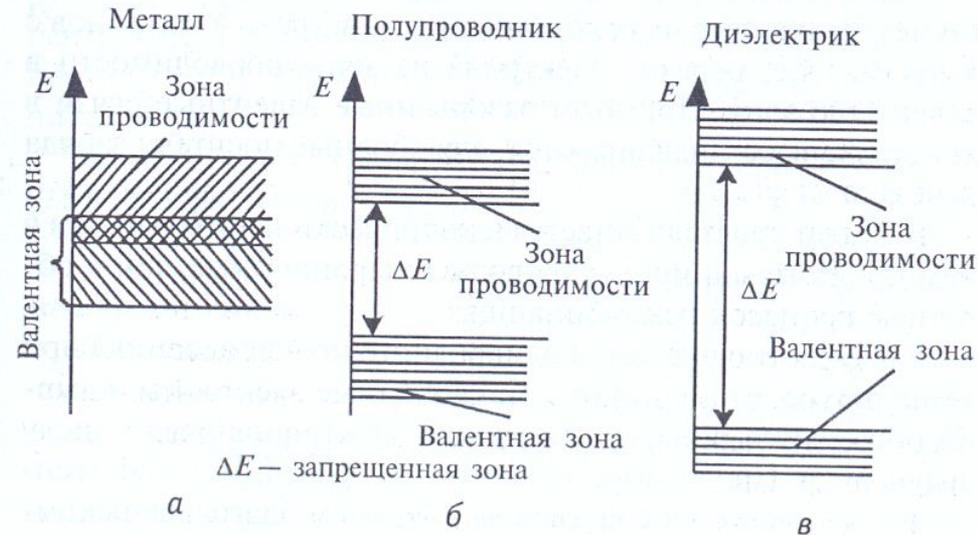
в) простейшая электрическая схема цепи состоящая из четырёх элементов:  $E$  - источника электрической энергии (ЭДС);  $r$  - сопротивления (резистора);  $L$  - индуктивности (катушки) и  $C$  - ёмкости (конденсатора)

# Элемент с нелинейной ВАХ – вакуумная лампа - диод



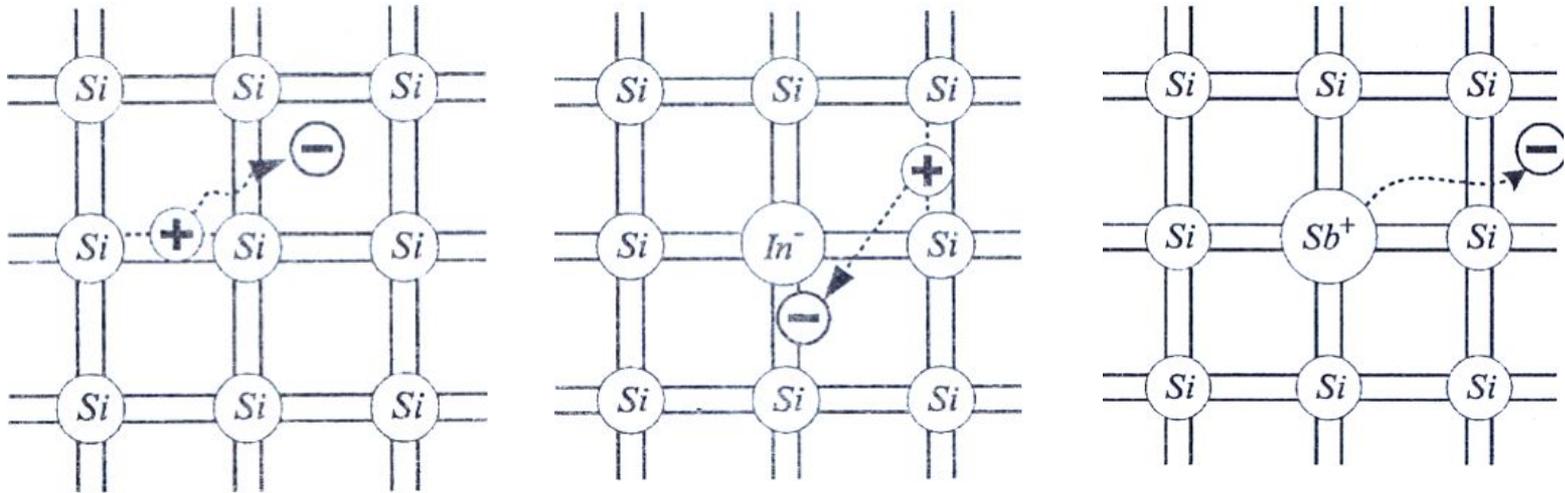
- Одно из основных свойств – односторонняя проводимость, перемещение под действием внешнего электрического поля электронов, сгенерированных катодом, к аноду

# Структура энергетических уровней металлов, полупроводников и диэлектриков



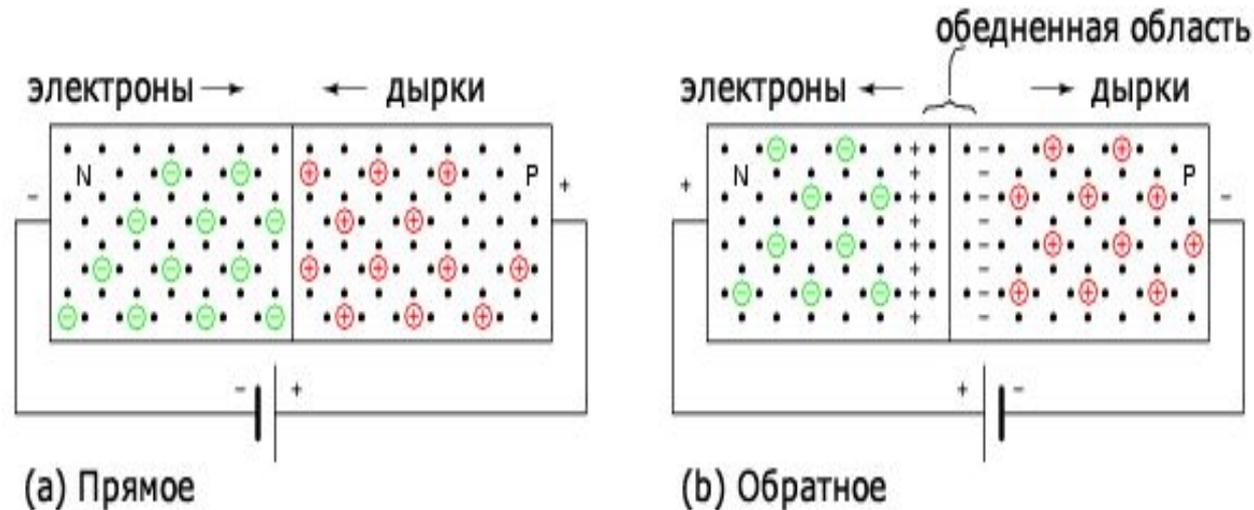
- Чистые полупроводники обладают собственной проводимостью, растущей с ростом температуры

# Кристаллические решетки чистого и легированного кремния



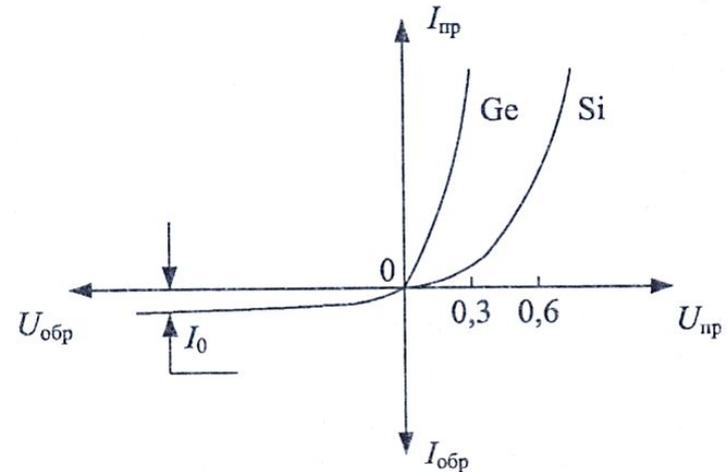
- In, Ga (3х-валентные)– акцепторные примеси, проводимость дырочного типа
- P, Sb,As (5-валентные)– донорные примеси, проводимость электронного типа

# Включение р-n перехода в простейшую электрическую цепь



- При «обратном» включении образуется обедненная подвижными носителями заряда область, обладающая низкой электропроводностью

# Схемотехническое обозначение, типичный внешний вид и идеализированные ВАХ маломощных диодов



$$I = I_s (e^{U/\varphi_T} - 1)$$

# Мощные промышленные диоды и диодные сборки



1



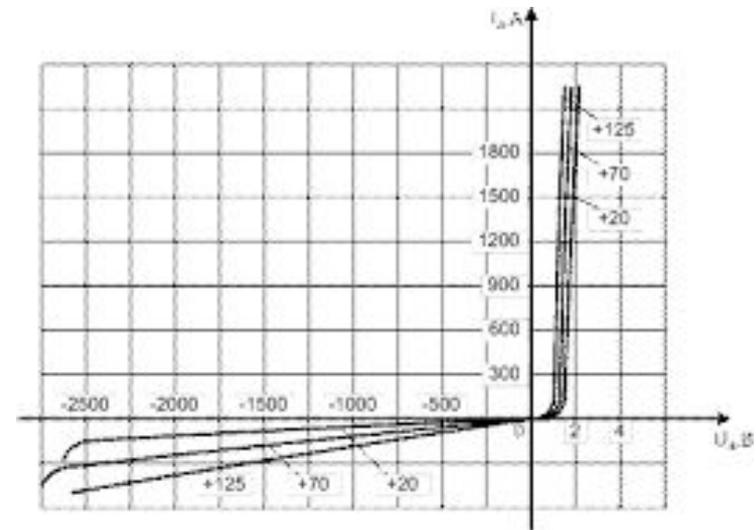
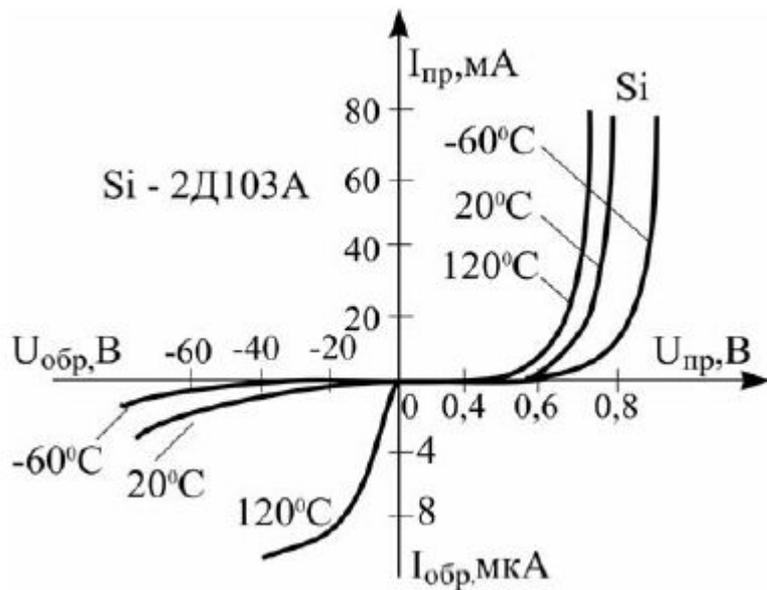
2



3

- 1 – диод среднего напряжения (2000 В) со средним током 500А
- 2 – диодная сборка – трехфазный мостовой выпрямитель (400В)
- 3 – диодная сборка на напряжение 60 кВ со средним током 1А

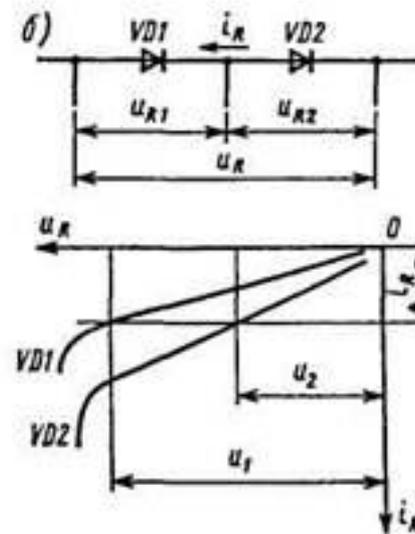
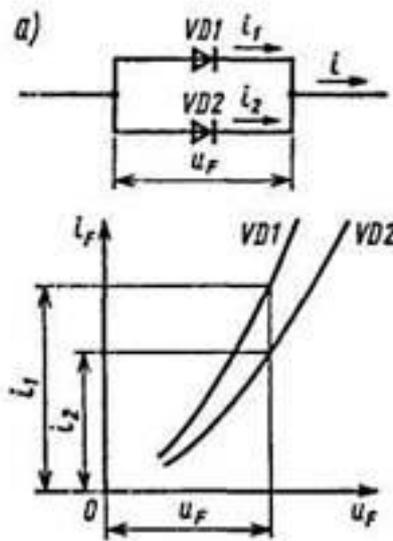
# ВАХ промышленного выпрямительного вентиля



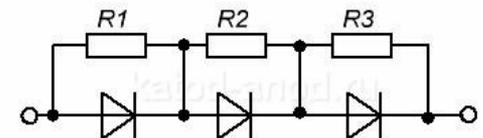
- Вентиль малой мощности

- Вентиль большой мощности

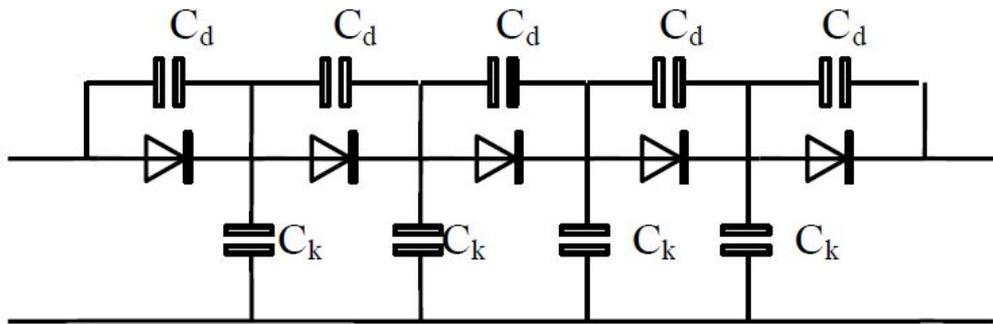
# Последовательное и параллельное соединение диодов



- Выравнивание обратного напряжения при последовательном включении



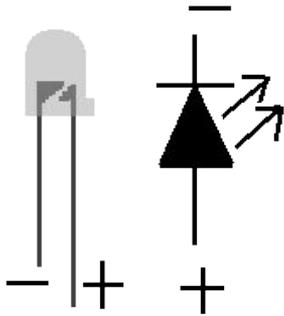
# Конструкция высоковольтного вентиля



- $C_k$ -конструктивная емкость,  $C_d$ -дополнительная емкость для выравнивания распределения напряжения.

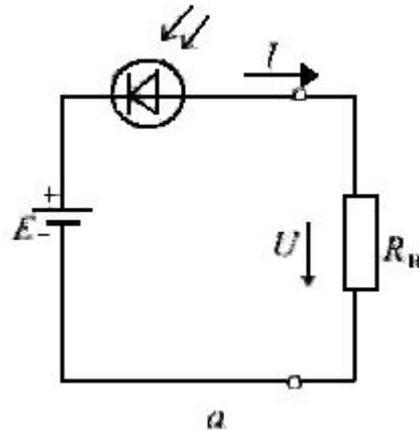
# Некоторые специальные типы диодов

Светодиод



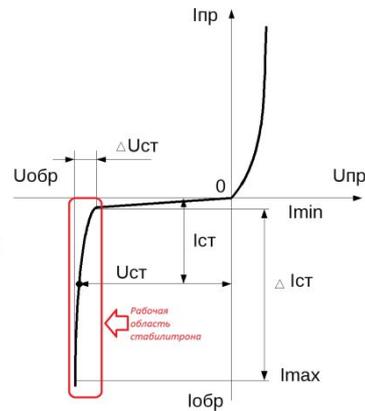
Источник  
света

Фотодиод



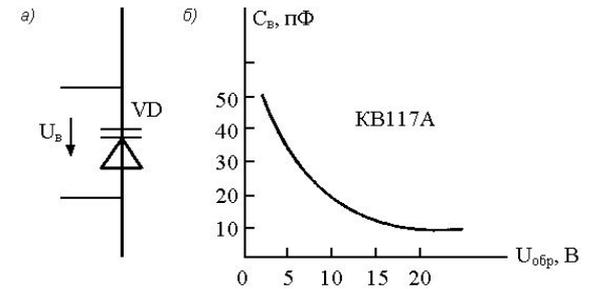
Приемник  
света

Стабилитрон



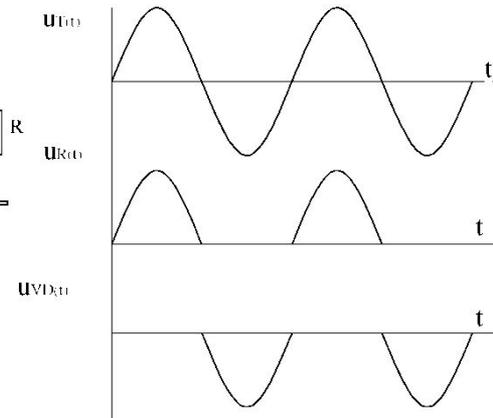
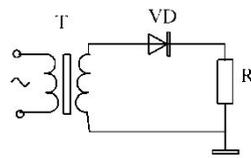
Стабилизатор  
напряжения

Варикап



Элемент с  
управляемой  
емкостью

# Простейший выпрямитель



- Основные элементы:
- трансформатор – определяет величину выходного напряжения, обеспечивает гальваническую развязку между нагрузкой и питающей сетью
- выпрямительный элемент - диод

Средняя величина выпрямленного напряжения  $U_d = U_m / \pi$

# Двухполупериодный (Full wave) выпрямитель

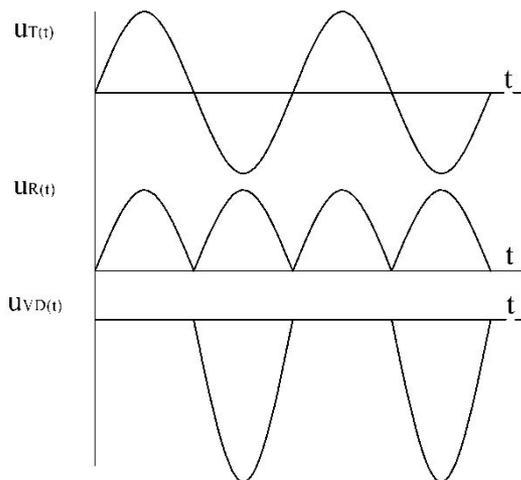
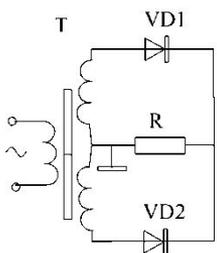
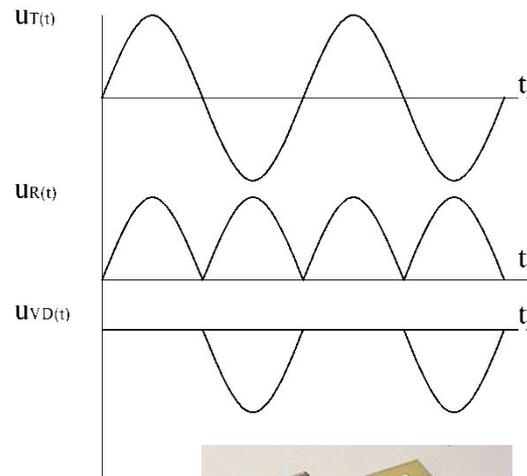
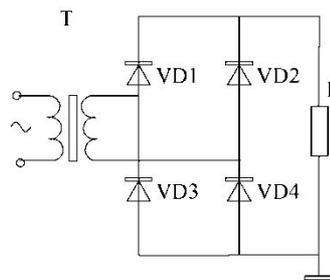
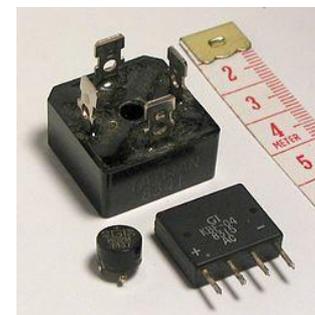


Схема со средней точкой

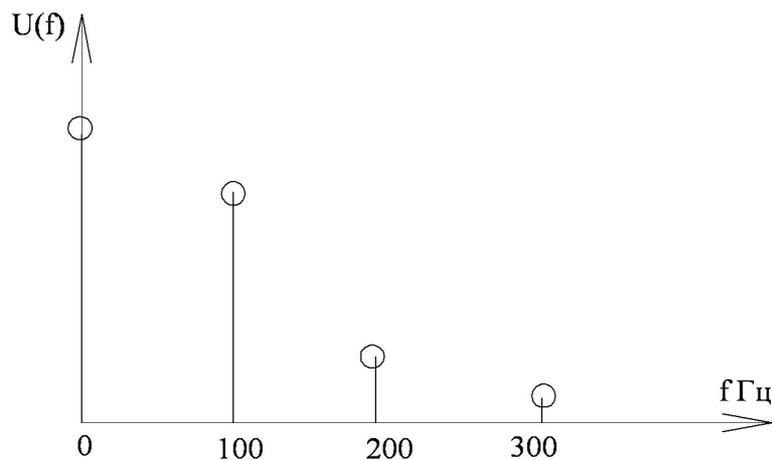
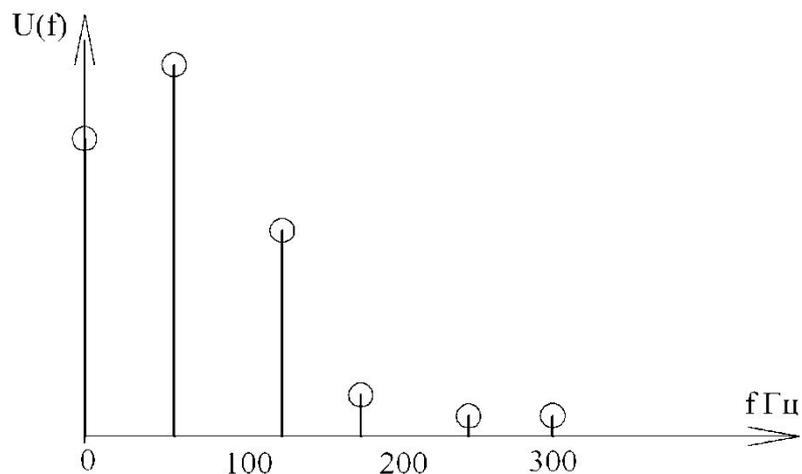


Мостовая схема



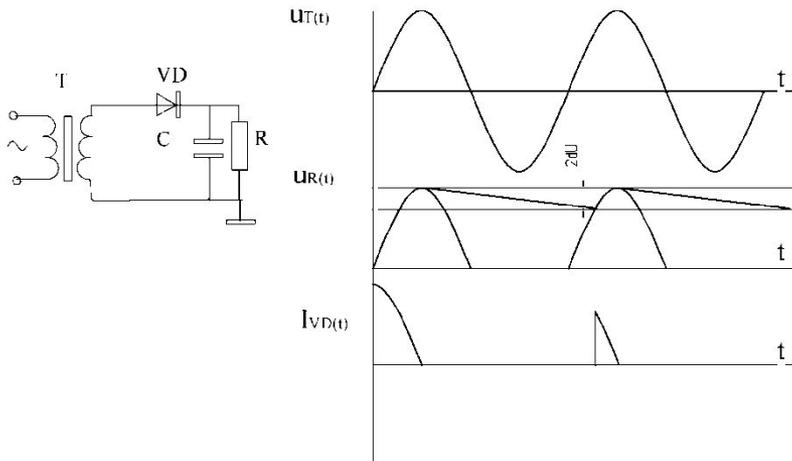
Средняя величина выпрямленного  
напряжения  $U_d = 2U_m/\pi$

# Качество выпрямленного напряжения



Гармонический состав  
однополупериодно и двухполупериодно выпрямленного напряжений промышленной частоты  
(разложение в ряд Фурье)

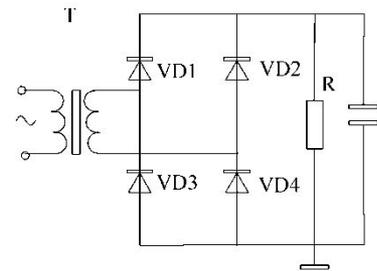
# Фильтрация выпрямленного напряжения – простейший емкостной фильтр



Однополупериодный  
выпрямитель

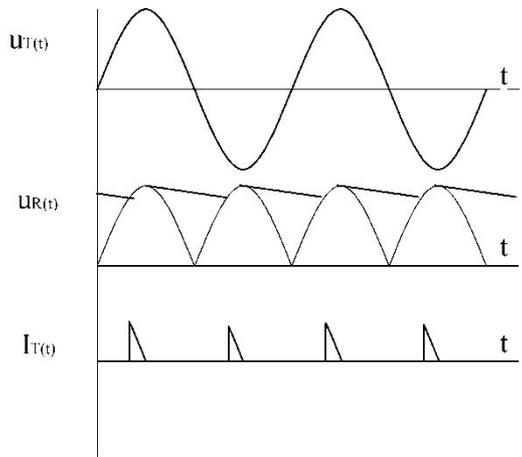
$$\delta u = \frac{T}{2RC}$$

**Относительная величина  
пульсаций выпрямленного  
напряжения**



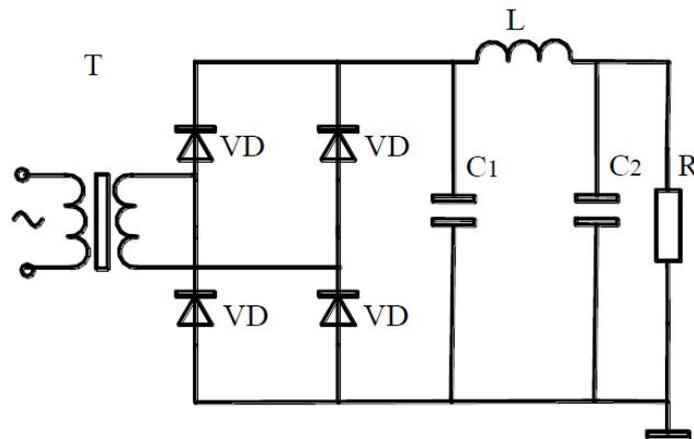
Мостовой  
двухполупериодный  
выпрямитель

$$\delta u = \frac{T}{4RC}$$



Power Supply  
AC Dual 20-58V

# Типовая схема выпрямителя средней мощности (менее 1 кВт)



Отличается от рассмотренных выше использованием дополнительного Г-образного LC – звена фильтрации

$$\delta U_1 = \frac{T}{4RC_1}$$

Пulsации на входе фильтра (на C1)

$$\delta U_2 = \frac{\delta U_1}{\omega_{\text{ос}}^2 LC_2}$$

Пulsации на выходе фильтра (на C2)

$\omega_{\text{ос}}$  – круговая частота основной гармоники выпрямленного напряжения

## Практические рекомендации по выбору параметров элементов схемы

1. Максимальное рабочее напряжение диодов должно превышать амплитудное значение питающего напряжения  $U_m$
2. Средний ток диодов должен в 1.5-2раза превышать ток нагрузки (ориентировочно)
3. Величина емкости  $C_1$  должна обеспечивать амплитуду пульсаций 10-15% от  $U_m$  (уменьшение пульсаций приводит к росту амплитуды тока через диоды, увеличение – к снижению выходного напряжения)
4. Резонансная частота звена LC2 должна быть многократно ниже основной частоты выпрямленного напряжения ( $2/T$ ), иначе вместо фильтрации выходного напряжения напряжение пульсаций может возрасти.

# Общая характеристика выпрямителей с емкостным и П-образным LC – фильтрами:

**Выходное напряжение выпрямителя близко к амплитуде питающего напряжения**

**Для получения малой величины пульсаций выпрямленного напряжения необходимо применять фильтрующие конденсаторы с большой емкостью или (и) дополнительные LC – звенья фильтрации**

**Форма кривой потребляемого от сети тока резко отличается от синусоидальной, что может приводить к нарушению требований ГОСТ Р 51317.3.2-99 (МЭК 61000-3-2-95) по уровню гармонических составляющих. Для выполнения требований ГОСТ может потребоваться установка дополнительных фильтрующих устройств на входе выпрямителя.**

**При включении выпрямителя может наблюдаться бросок потребляемого тока, связанный с первоначальной зарядкой конденсаторов фильтра. Параметры диодов выпрямителя должны выбираться с учетом этого обстоятельства.**

# Выпрямители с умножением напряжения

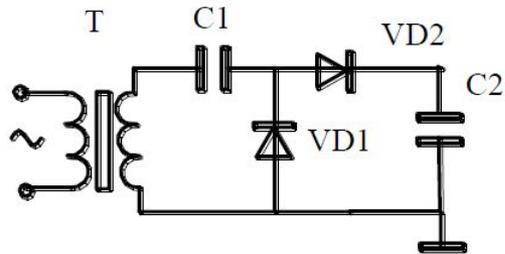


Схема удвоения напряжения

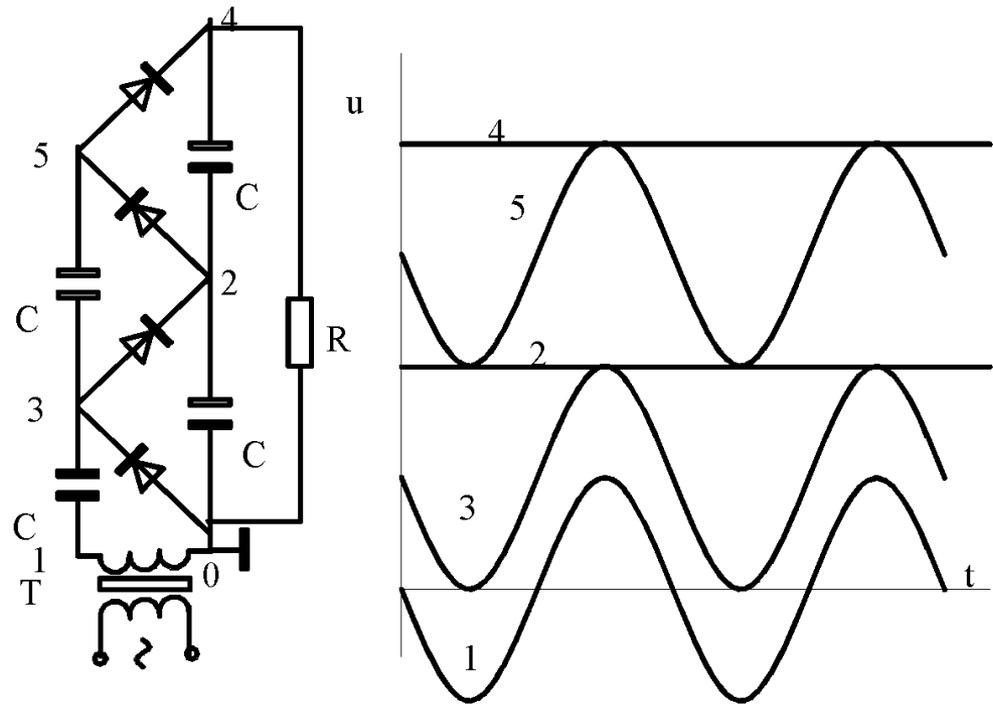


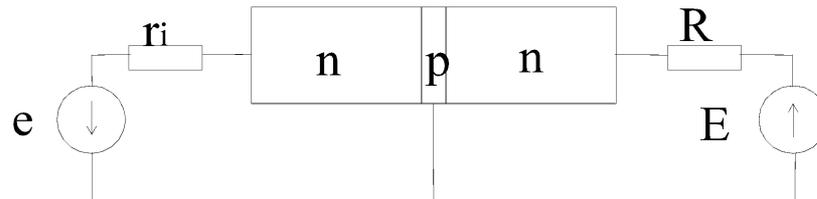
Схема учетверения напряжения

Область применения: источники высокого напряжения небольшой мощности. Основное достоинство: могут использоваться элементы с рабочим напряжением значительно ниже выходного.

Недостаток: с ростом числа ступеней умножения резко растут пульсации выпрямленного напряжения и внутреннее сопротивление выпрямителя.

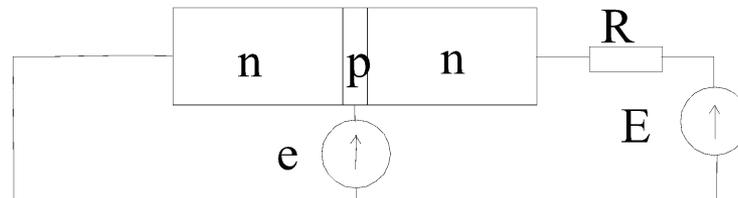


# Типовая структура биполярного транзистора, основные схемы включения



$$\alpha = \frac{I_k}{I_e} < 1 \quad (0.95-0.99)$$

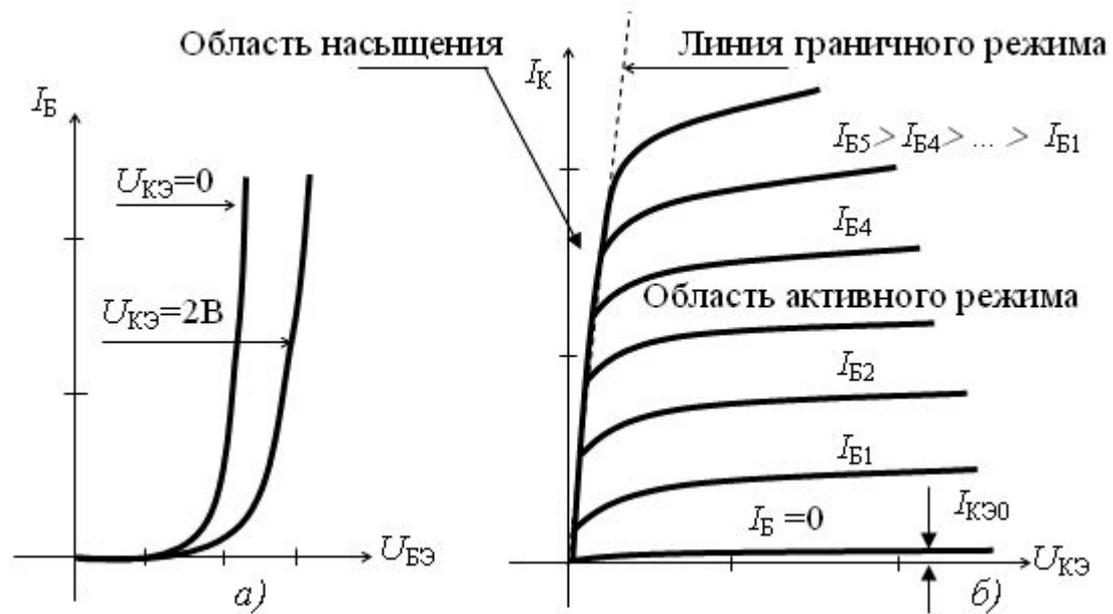
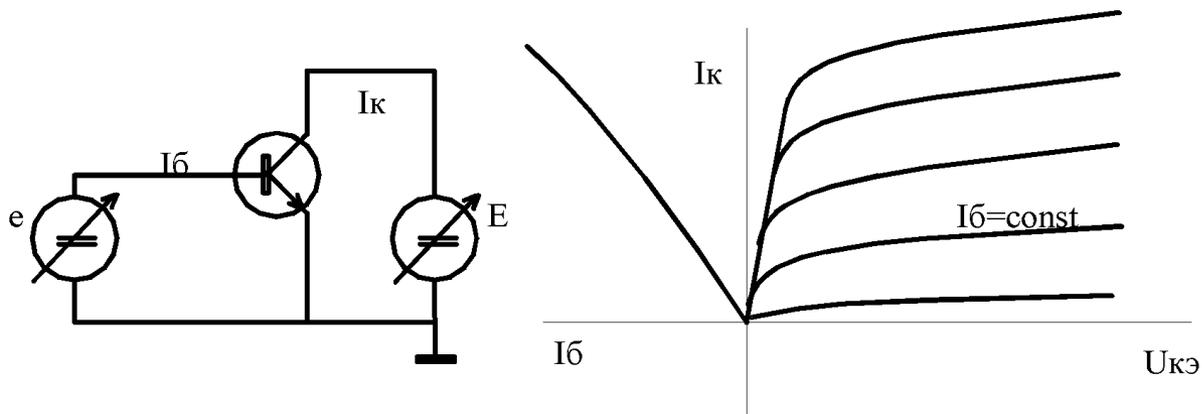
Схема включения транзистора с общей базой



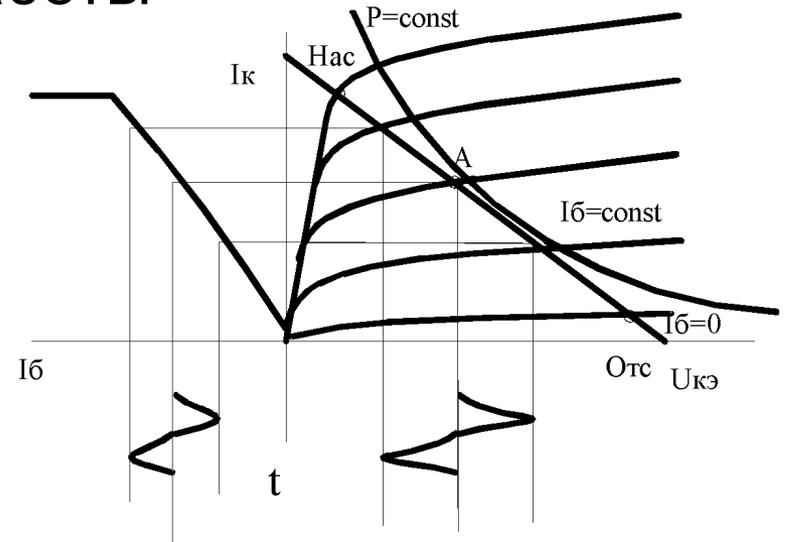
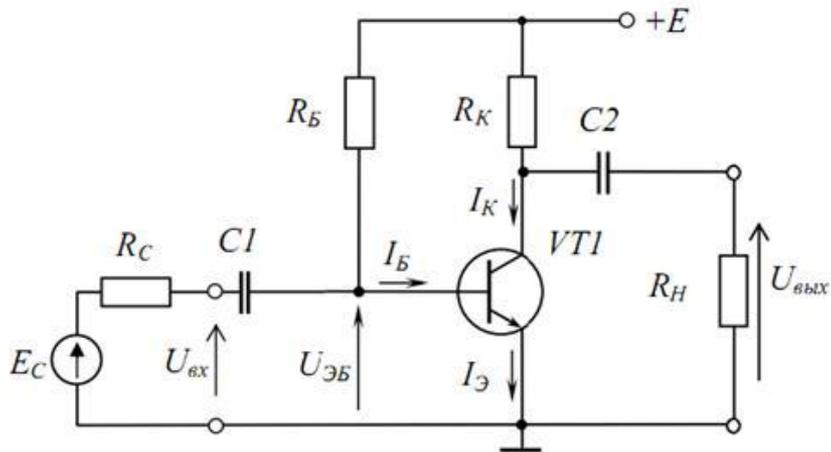
$$\beta = \frac{I_k}{I_b} = \frac{\alpha}{1-\alpha} \gg 1$$

Схема включения транзистора с общим эмиттером

# Статические характеристики биполярного транзистора (схема с общим эмиттером)



# Простейший усилительный каскад с общим эмиттером и графический анализ его работы



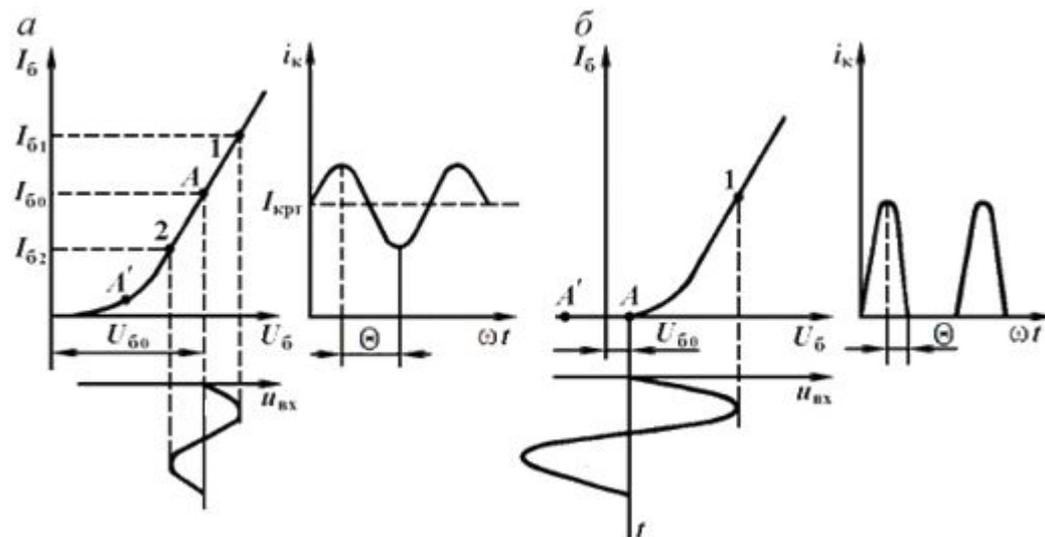
$$E = I_K R_K + U_{KЭ}$$

$$I_K = \Phi(U_{KЭ}, I_B)$$

Уравнение нагрузочной прямой  
Уравнение коллекторных характеристик транзистора

При заданных  $E_K$  и  $R_K$  значения  $I_K$  и  $U_{KЭ}$  определяются током базы  $I_B$

# Усилительный режим работы транзистора



# Ключевой режим работы транзистора

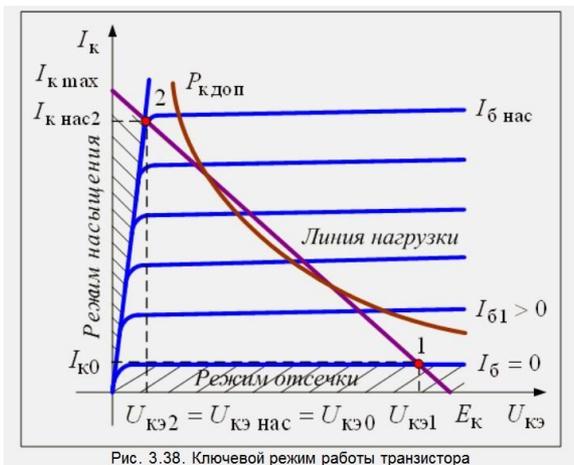
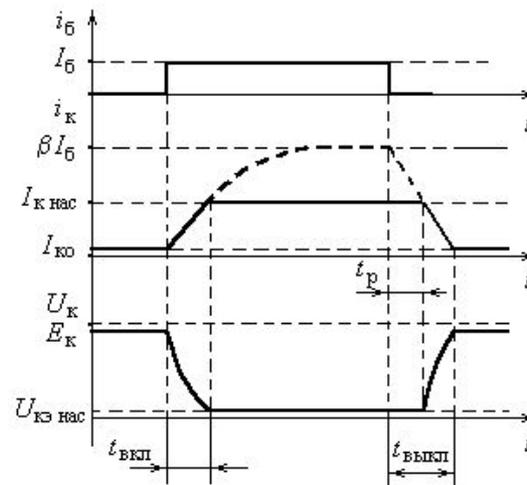
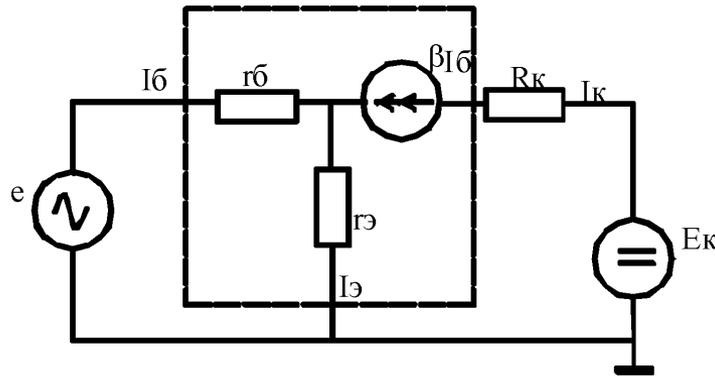


Рис. 3.38. Ключевой режим работы транзистора



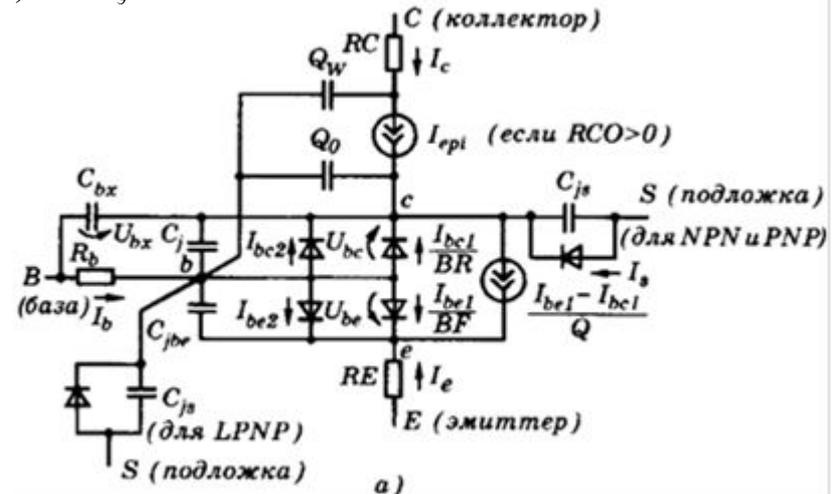
# Схема замещения биполярного транзистора



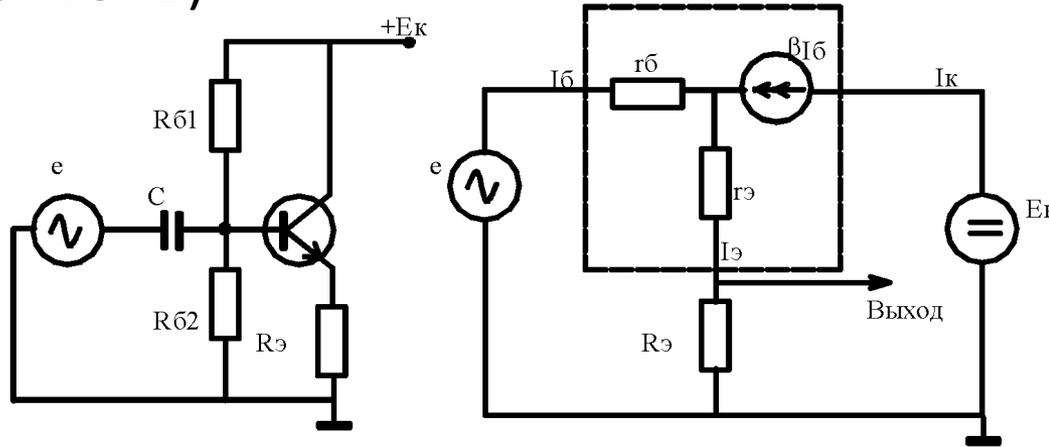
Простейшая «малосигнальная» схема замещения биполярного транзистора и усилительного каскада

$$r_{ex} = \frac{\Delta u_{бэ}}{\Delta i_{бэ}} = r_{б} + r_{э}(\beta + 1) \quad K_u = \frac{-\Delta i_{к} R_{к}}{\Delta i_{бэ} r_{ex}} = \frac{-\beta R_{к}}{r_{б} + r_{э}(\beta + 1)} \approx -\frac{R_{к}}{r_{э}}$$

Схема замещения Гуммеля-Пуна, используется в компьютерных моделях электронных устройств, описывает как линейный, так и ключевой режим.



# Принципиальная схема и схема замещения каскада с общим коллектором (эмиттерный повторитель)



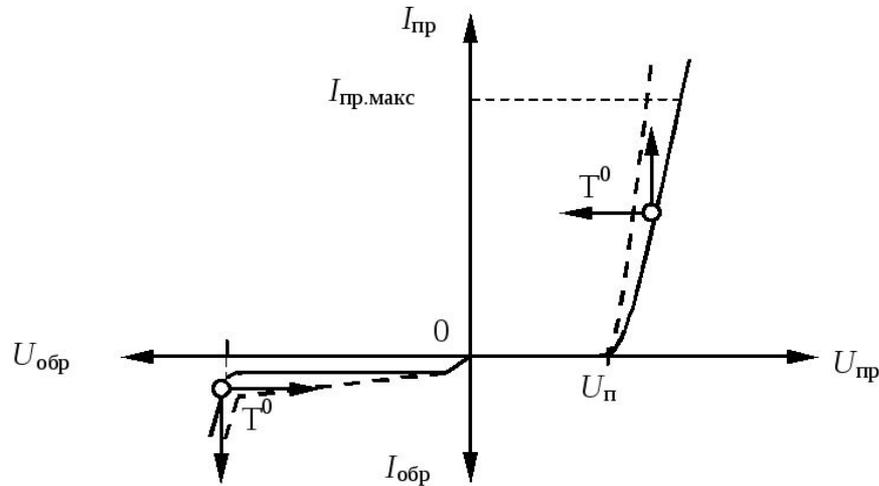
$$r_{ex} = \frac{\Delta u_{\bar{o}\bar{e}}}{\Delta i_{\bar{o}\bar{e}}} = r_{\bar{o}} + (r_{\bar{e}} + R_{\bar{e}})(\beta + 1)$$

$$K_u = \frac{\Delta i_{\bar{e}} R_{\bar{e}}}{\Delta i_{\bar{o}\bar{e}} r_{ex}} \approx \frac{(\beta + 1) R_{\bar{e}}}{r_{\bar{o}} + (r_{\bar{e}} + R_{\bar{e}})(\beta + 1)} < 1$$

Отличительная особенность –  
высокое входное сопротивление.

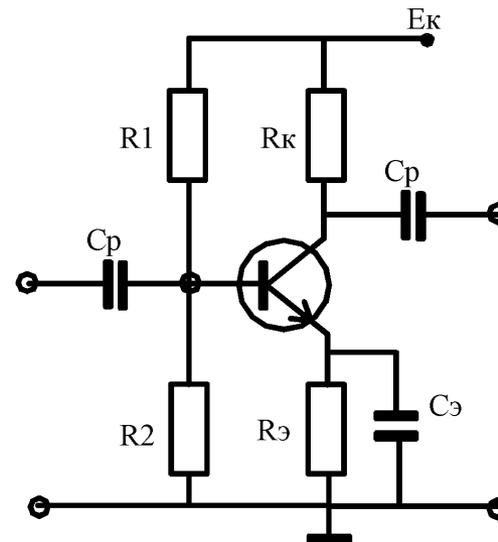
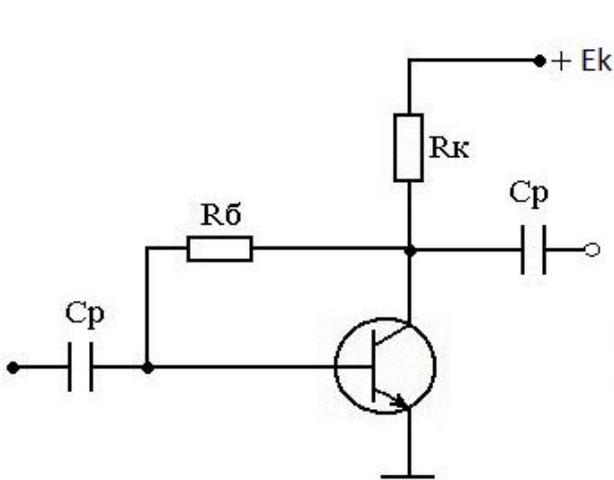
При этом усиление по напряжению отсутствует ( $K_u \leq 1$ ). Основное назначение – согласование усилителя с высокоомным источником сигнала.

# Влияние температуры на работу транзистора и простейшие примеры термостабилизации режима



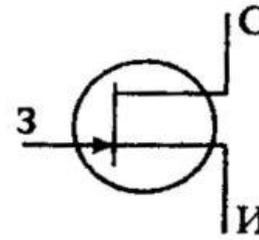
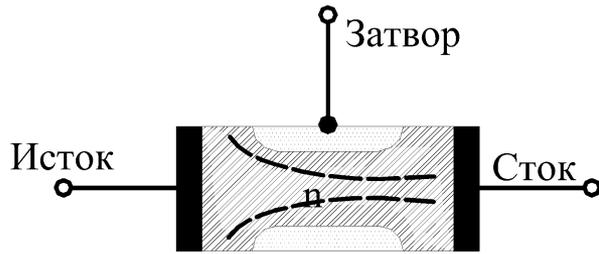
## теп

Назначение термостабилизации – сохранение положения рабочей точки каскада при температурных изменениях характеристик транзистора

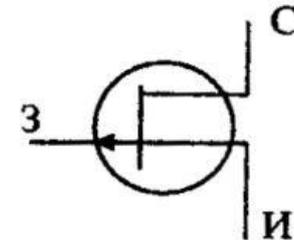


# Полевые транзисторы (FET- field effected transistors)

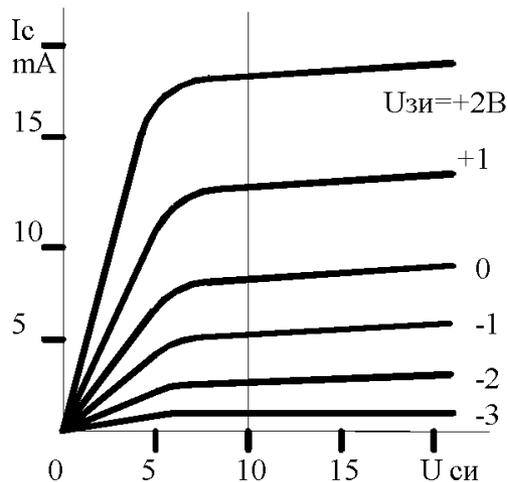
Транзисторы с затвором на p-n –переходе



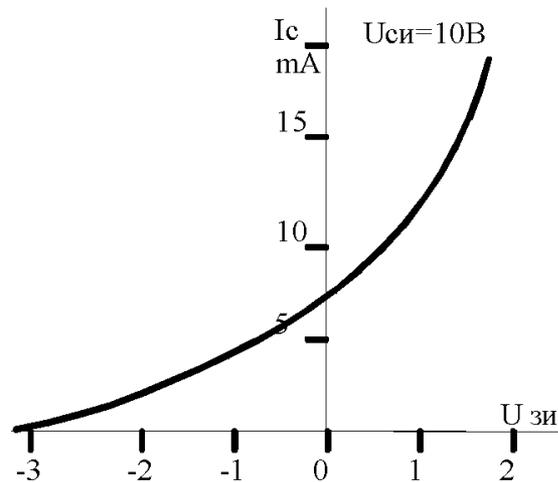
*n*-канал



*p*-канал



a



b

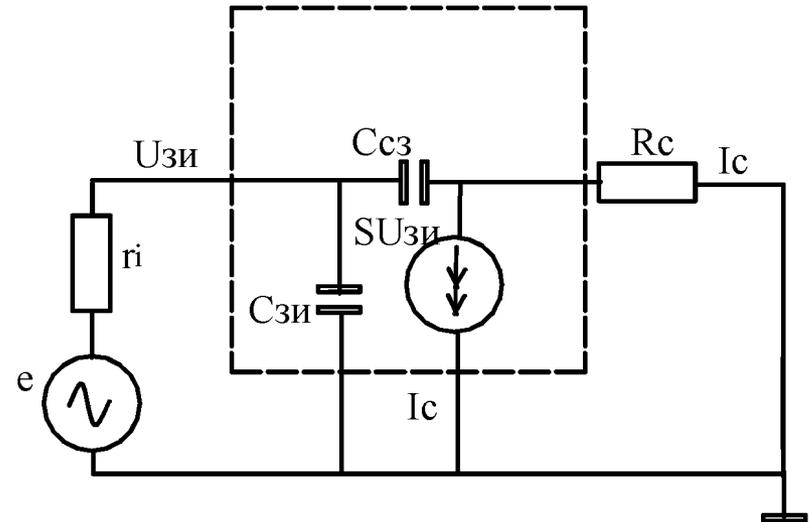
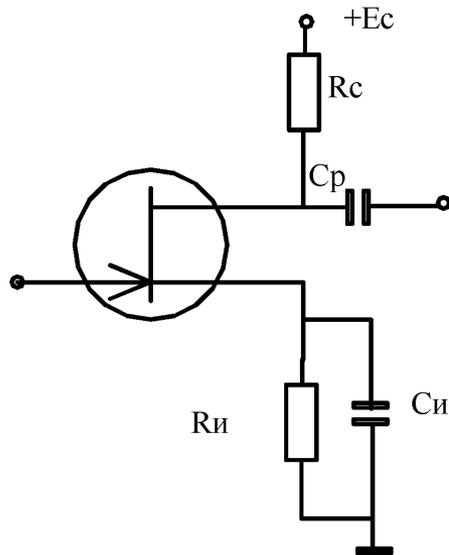
$$S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зи}}$$

Крутизна  
характеристики  
(англ. steepness)

Пример статических характеристик полевого транзистора с n-каналом

# Каскад предварительного усиления на полевом транзисторе с управляющим р-п переходом и его схема замещения (малосигнальная)

Основное назначение – согласование усилительного тракта с  
ВЫСОКООМНЫМ ИСТОЧНИКОМ СИГНАЛА



Коэффициенты усиления на низких частотах

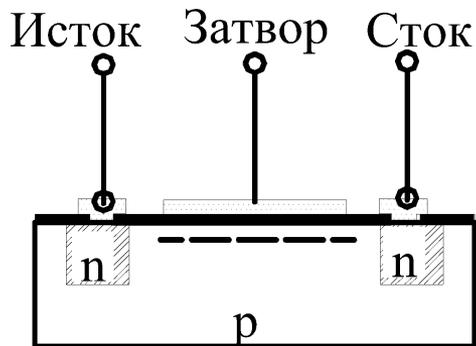
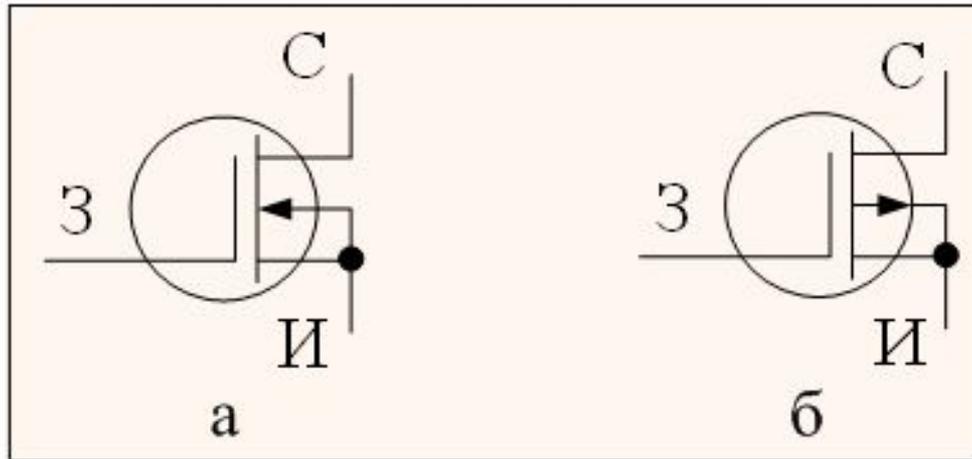
$$K = S \cdot R_c \quad \text{для области частот } \omega > 1/(R_{и}C_{и})$$

$$K = \frac{SR_c}{(1 + SR_u)} \quad \text{для области частот } \omega < 1/(R_{и}C_{и})$$

Для высоких частот (десятки и сотни мегагерц) необходим  
учет паразитных емкостей транзистора  $C_{зи}$  и  $C_{сз}$

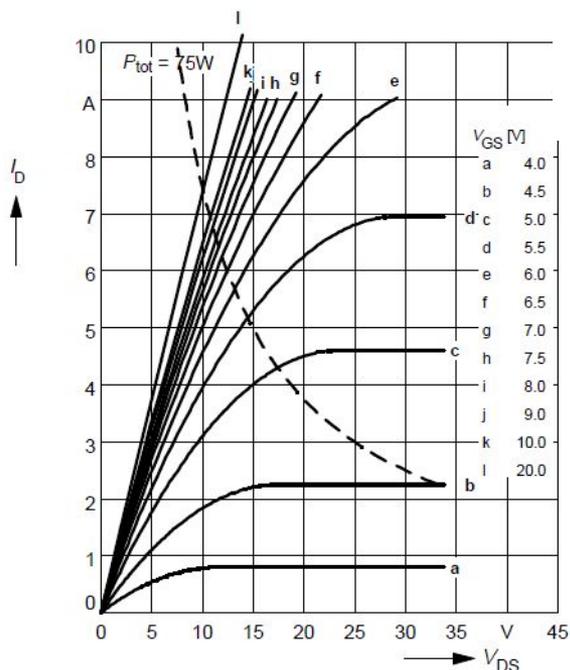
# Полевой транзистор с изолированным затвором

Встроенный канал (обогащенный) n- типа (а) и p-типа (б)



Для канала n- типа (подложка – обедненный p- полупроводник ) увеличение проводимости канала наступает при положительном сигнале затвор-исток  
Вид статических характеристик аналогичен случаю транзистора с управляющим p-n переходом, сопротивление затвора практически бесконечное.  
ОЧЕНЬ боятся статического электричества

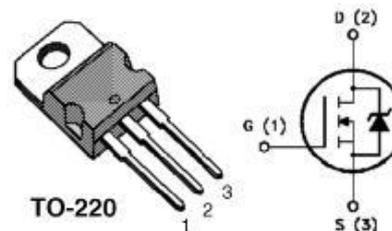
# Ключевые КМОП транзисторы с индуцированным



Type	$V_{DS}$	$I_D$	$R_{DS(on)}$
BUZ 90	600 V	4.5 A	1.6 $\Omega$

## IRFZ34

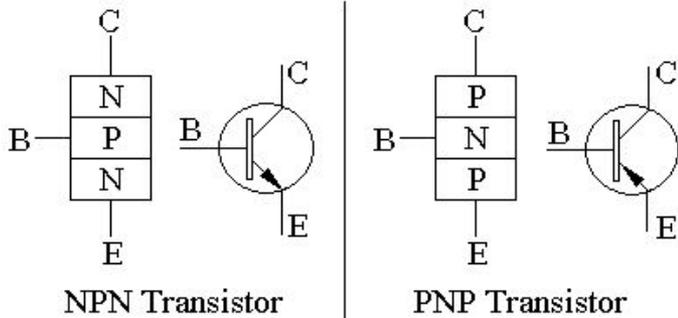
$V_{DS}$ (V)	60	
$R_{DS(on)}$ ( $\Omega$ )	$V_{GS} = 10 V$	0.050



Основное назначение – силовые импульсные устройства. **Важно:** существует определенное пороговое значение управляющего напряжения затвор-исток, обычно около 4В. Необходимо для предотвращения несанкционированного включения в условиях помех. В структуре присутствует «обратный» диод, шунтирующий транзистор при изменении полярности напряжения сток-исток

# Обзор типов транзисторов

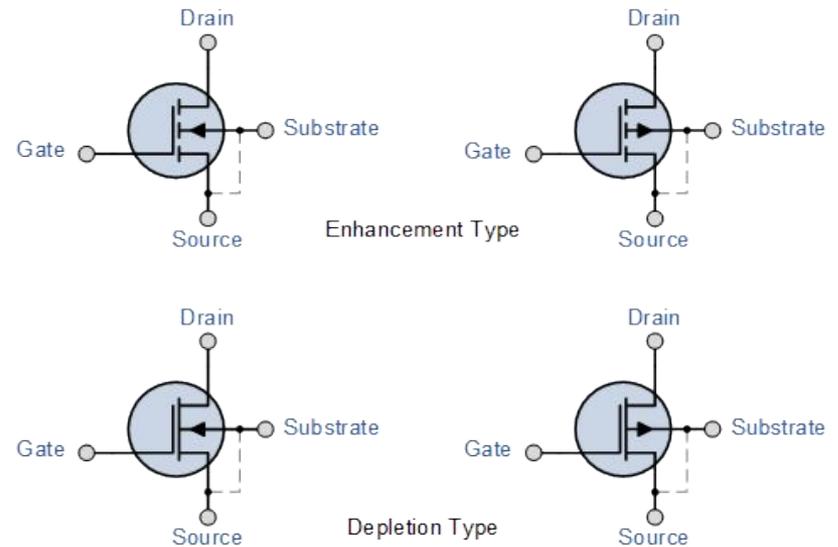
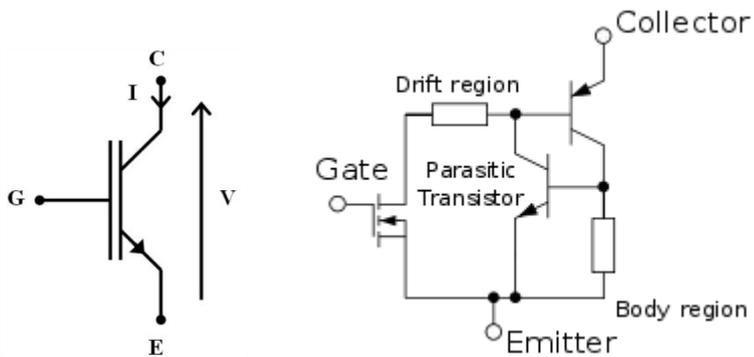
## BIPOLAR TRANSISTORS



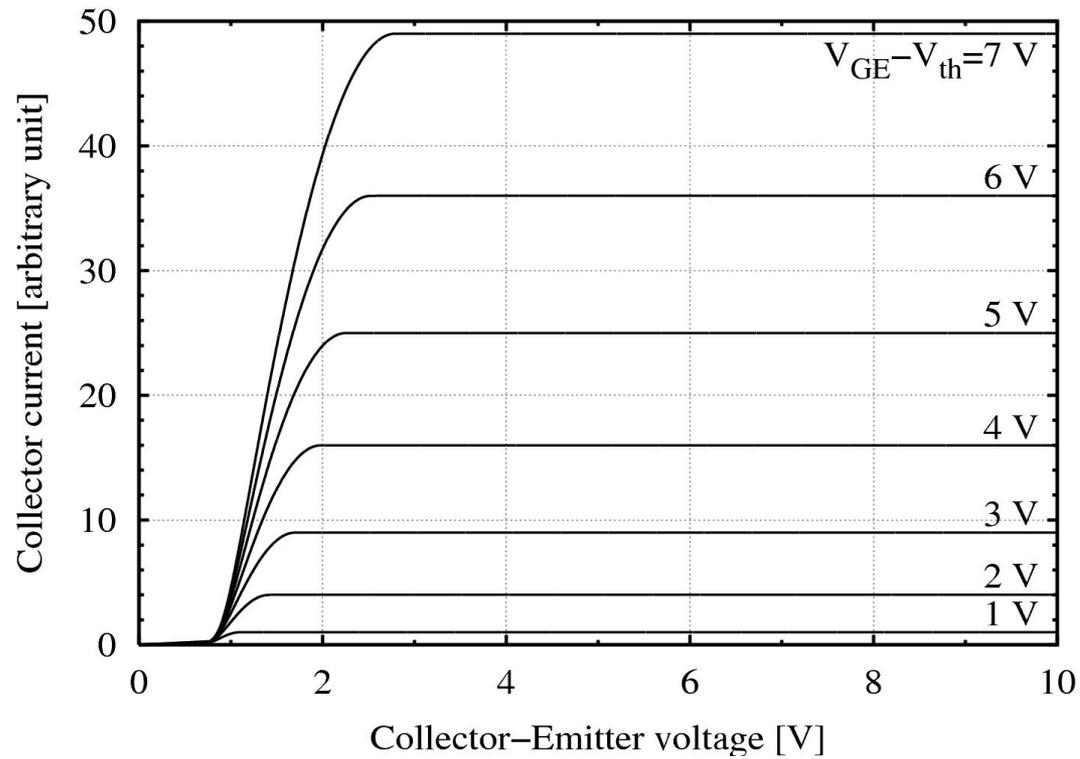
## Field Effect Transistors with insulated gate (MOSFET)



## Insulated Gate Bipolar transistor (IGBT)



# Типичные статические характеристики IGBT



$V_{th}$  – threshold value depending on channel properties

# Усилители электрических сигналов

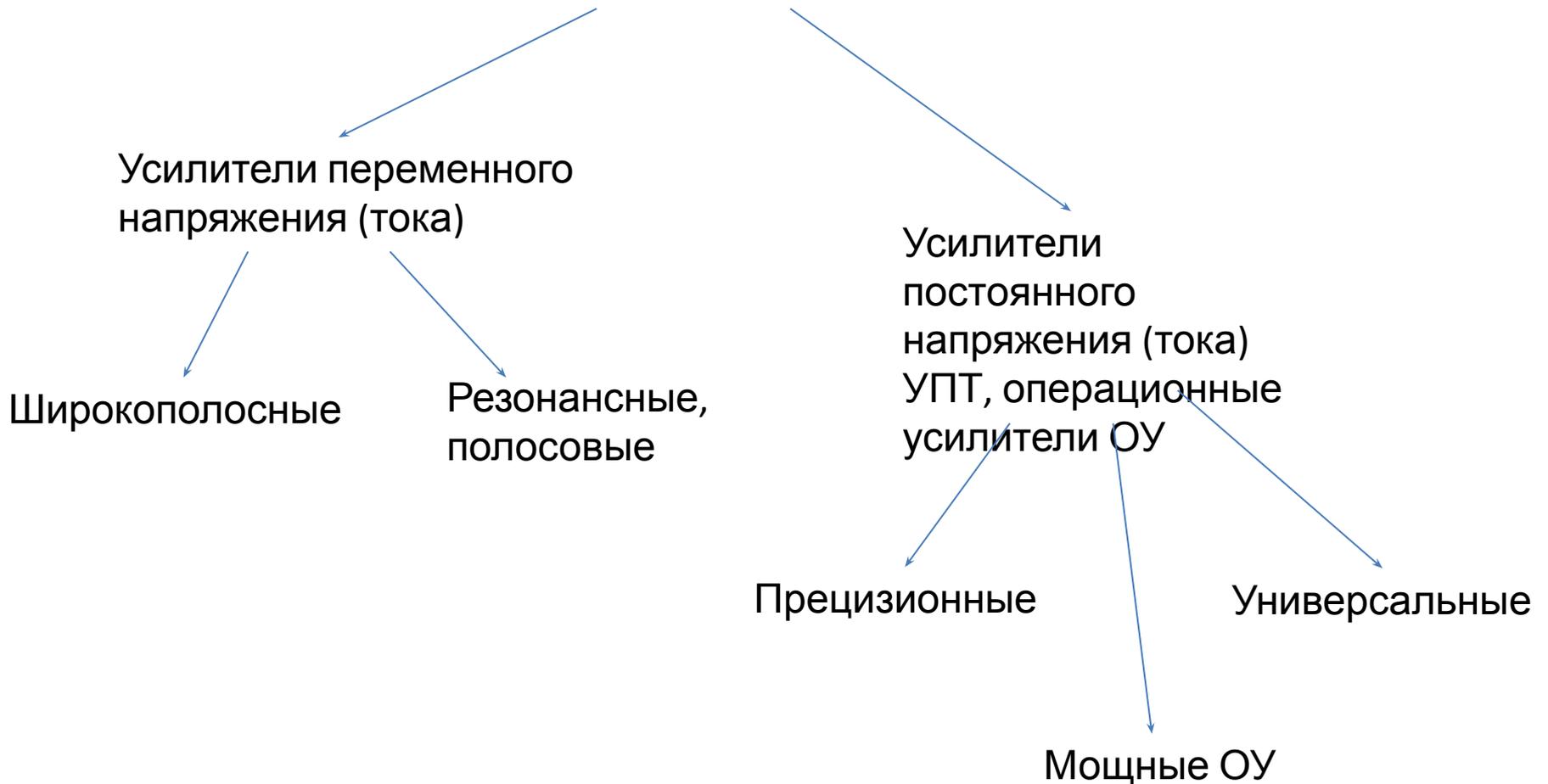
Линейные: в заданном диапазоне выходных напряжений обеспечивают связь входного и выходного сигналов, близкую к пропорциональной. Основным режимом работы транзисторов – линейный (без перехода в режимы отсечки и насыщения)

Основные параметры усилителя: входное сопротивление, коэффициент усиления, выходное сопротивление, максимальная выходная мощность, границы частотного

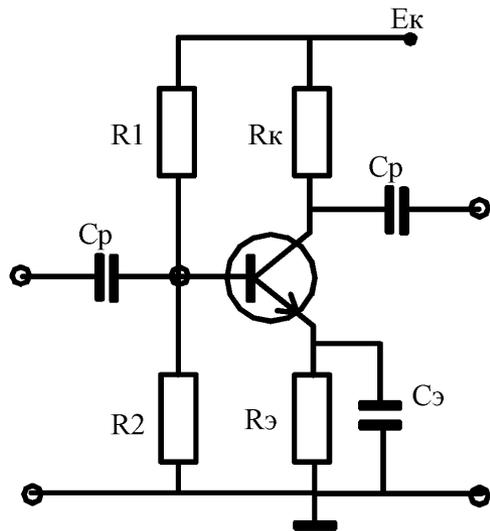
диапазона  
Импульсные: усиление мощности импульсных сигналов с сохранением временных интервалов, пропорциональность входного и выходного сигналов не существенна. Основным режимом работы транзисторов – ключевой (режимы отсечки и насыщения)

Основные параметры усилителя: входное сопротивление, выходное напряжение, выходное сопротивление, максимальная выходная мощность, максимальная скорость изменения выходного напряжения (время переходного процесса)

# Линейные усилители



## Простейший широкополосный усилитель переменного напряжения с элементами термостабилизации



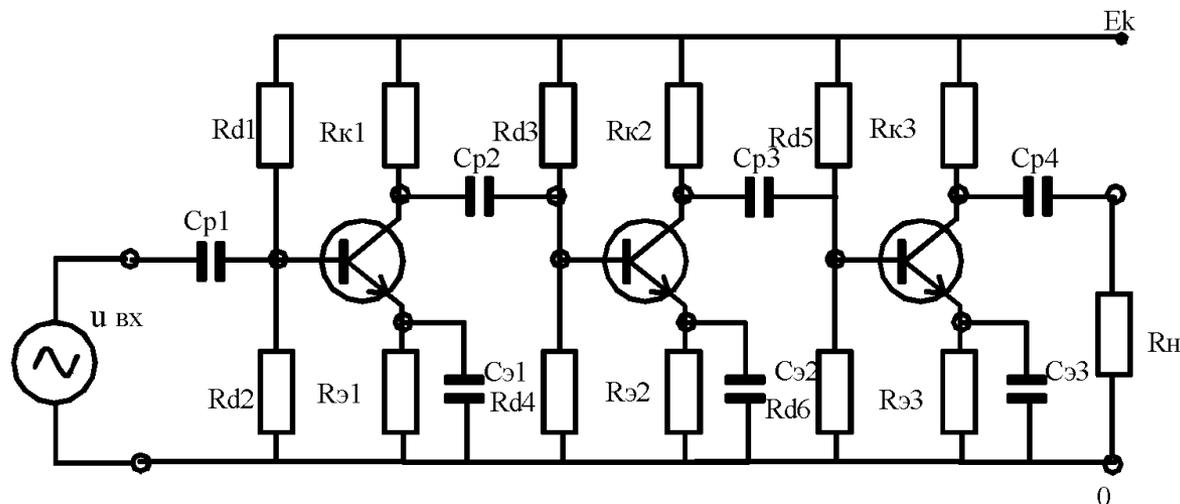
R1, R2 – делитель напряжения для установки рабочей точки  
Rэ, Сэ – цепь термостабилизации  
Ср – разделительные конденсаторы

Коэффициент усиления напряжения для однокаскадного усилителя обычно около 10-20

Верхняя граница частотного диапазона определяется характеристиками транзистора и величиной коллекторной нагрузки,

Нижняя – соотношением разделительных емкостей со входным сопротивлением и сопротивлением нагрузки

# Многокаскадный усилитель переменного напряжения



Позволяет получить высокий коэффициент усиления, при этом частотный диапазон сужается по сравнению с однокаскадным усилителем.

Основная проблема при создании многокаскадных усилителей: согласование входных и выходных сопротивлений каскадов

# Усилители МОЩНОСТИ

Как правило, используются в качестве выходных каскадов многокаскадных усилителей. Основная особенность усилителей мощности – повышенные требования к коэффициенту полезного действия. Определяются как стремлением к экономии энергии источника питания, так и ограниченной возможностью теплоотвода транзисторов выходного каскада

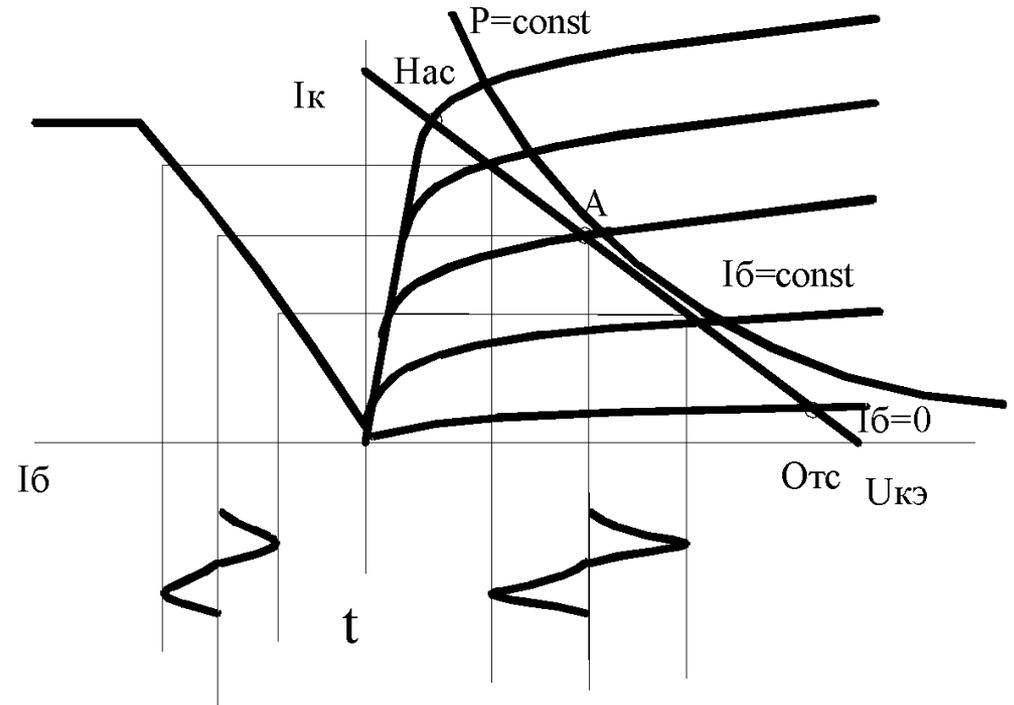
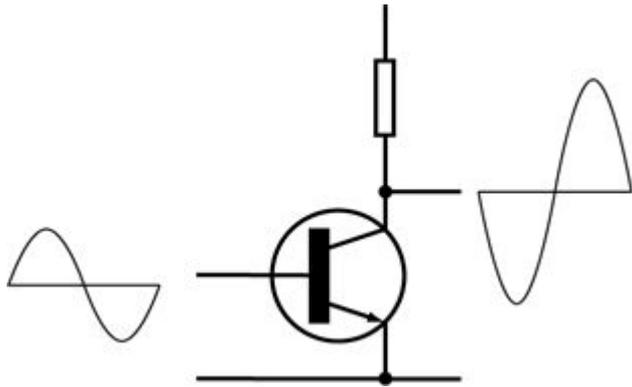
Различают 4 основных класса усилителей мощности: А, В, АВ и D

**Класс А** – рабочая точка выходного каскада близка к середине нагрузочной прямой. Имеет наименьший КПД.

**Классы В и АВ** используют так называемую двухтактную схему усиления, при использовании которой положительная и отрицательная полуволны сигнала усиливаются разными транзисторами.

**Класс D** – используется ключевой режим работы транзисторов

# Режим усиления класса А



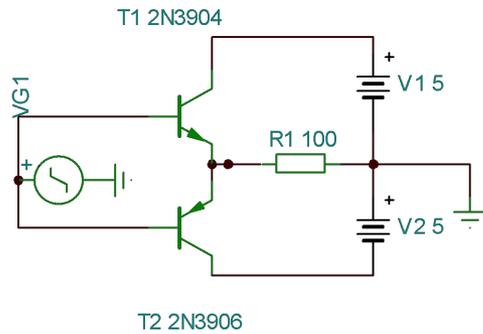
Мощность  
потребляемая  
от источника

$$P = E_{\kappa}^2 / 2R_{\kappa}$$

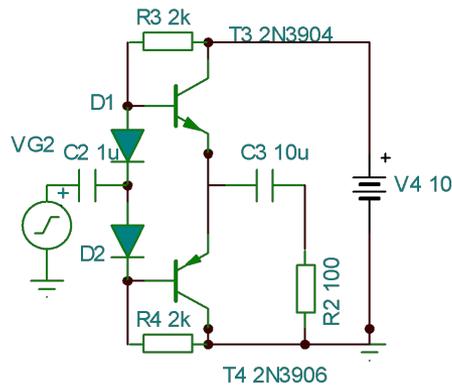
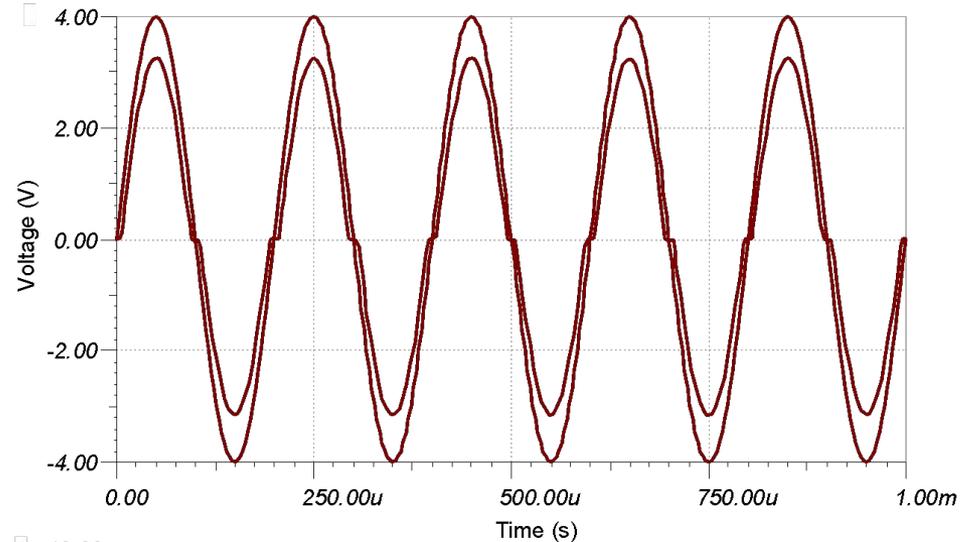
Мощность в  
коллекторной  
нагрузке

$$P_{\text{н}} = \left( \frac{E_{\kappa}}{2\sqrt{2}} \right)^2 / R_{\kappa} = E_{\kappa}^2 / 8R_{\kappa}$$

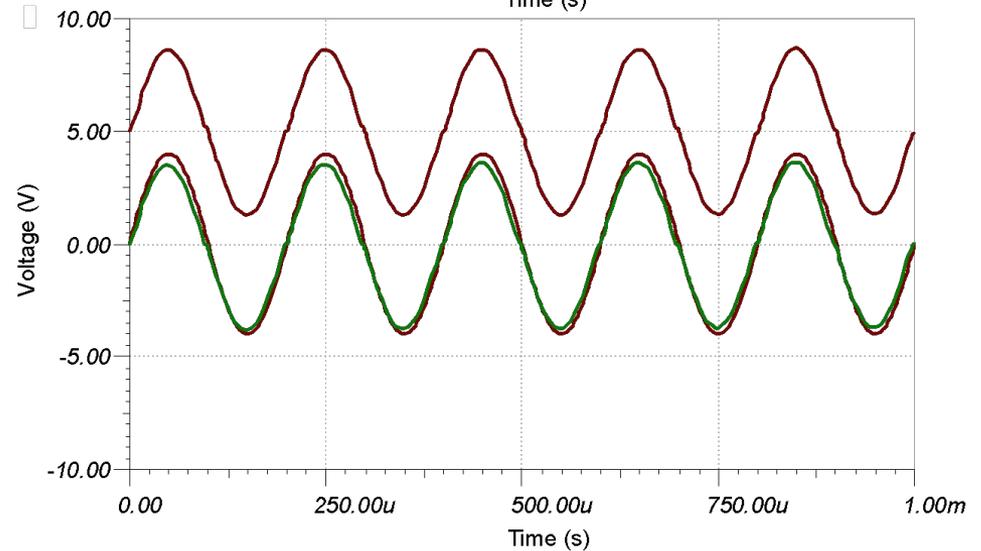
# Двухтактные (полумостовые) усилители класса В и АВ



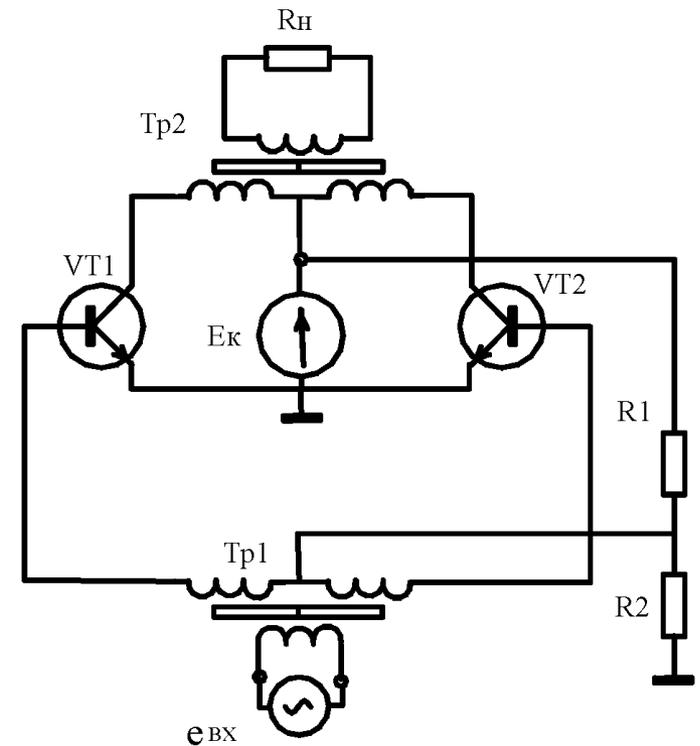
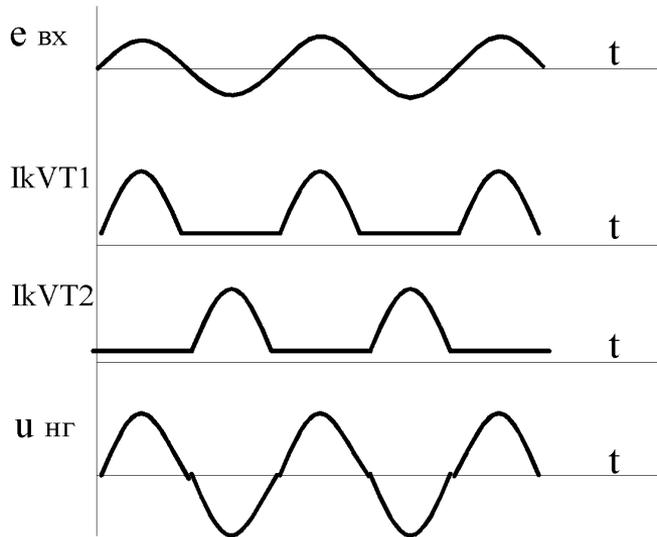
Усилитель класса В с  
двухполярным питанием



Усилитель класса АВ с  
однополярным питанием



## Двухтактный трансформаторный усилитель мощности класса АВ



Смещение рабочей точки транзисторов в сторону их открывания осуществляется подачей постоянного смещения на средний вывод фазоинверсного трансформатора  $Tr1$

# Основные характеристики усилителей

$K_U = U_{\text{ВХ}} / U_{\text{ВЫХ}}$  Коэффициент усиления по напряжению

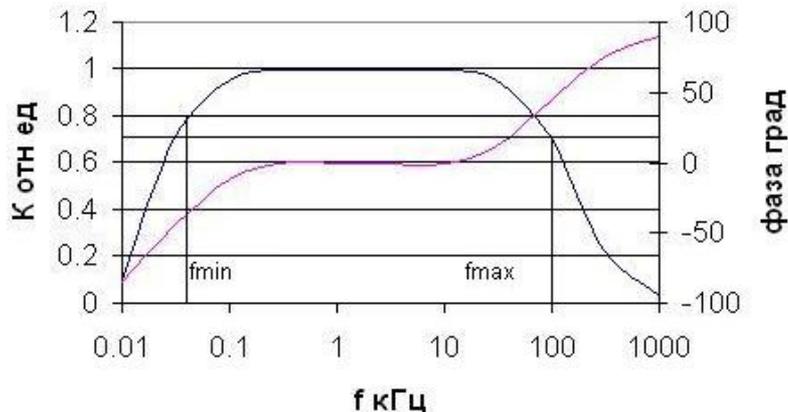
$P_{\text{ВЫ}} / U_{\text{ВЫ}}$  Выходная мощность и максимальное выходное напряжение

$\eta = P_{\text{ВЫХ}} / P_{\text{ИСТ}}$  К.п.д.

$$K_{\Gamma} = \sqrt{U_{2m}^2 + U_{3m}^2 + \dots + U_{nm}^2} / U_{1m}$$

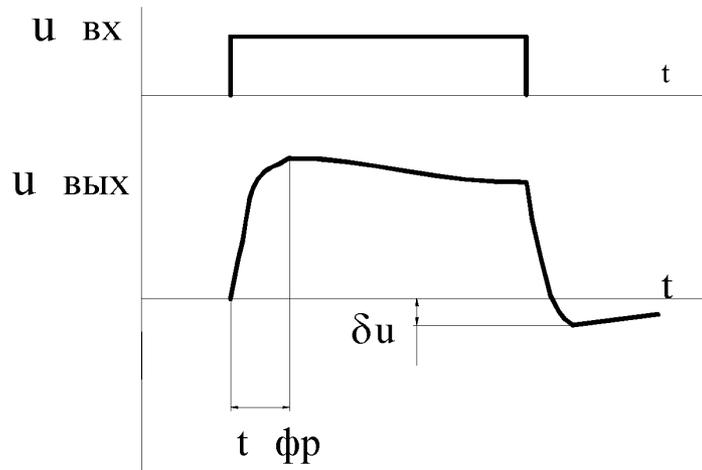
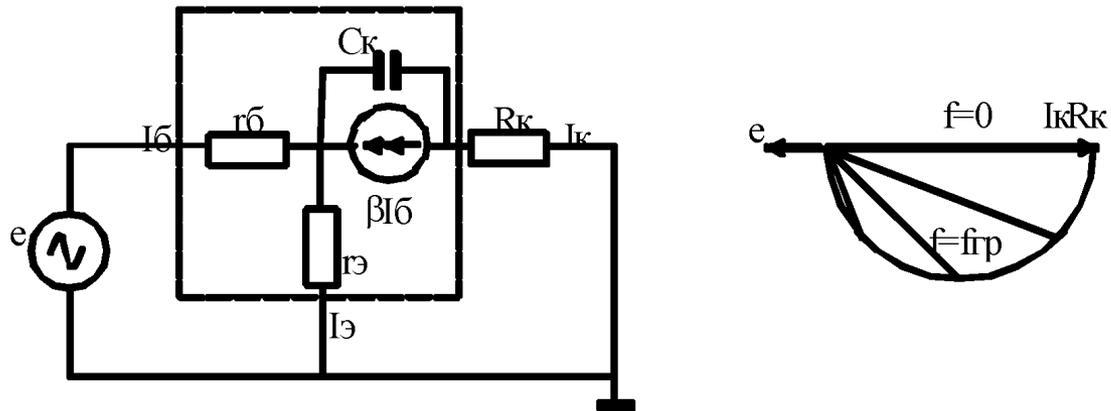
Коэффициент гармоник (нелинейных искажений)

АЧХ ФЧХ



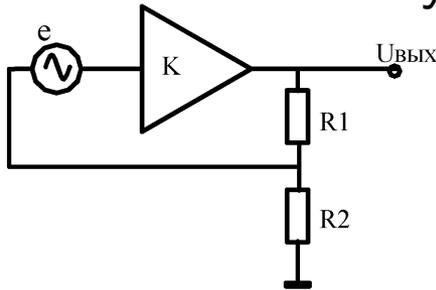
Амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики

# Векторное представление частотной характеристики усилителя



Переходная характеристика усилителя

## ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ В УСИЛИТЕЛЯХ



Пример организации обратной связи в усилителе

Коэффициент обратной связи (доля выходного напряжения, подаваемая на вход):

$$K_{\beta} = K / (1 - \beta K)$$

$$\beta = \frac{R2}{R1 + R2}$$

$$U_{\text{вых}} = K(e + \beta U_{\text{вых}})$$

Коэффициент усиления усилителя, охваченного обратной  
связью

$\beta K < 0$  отрицательная обратная связь о.о.с.

$$K_{\beta} < K$$

$\beta K > 0$  положительная обратная связь п.о.с.

$$K_{\beta} > K$$

Важные  
предельны  
е случаи

о.о.с.

$$K \rightarrow -\infty$$

$$K_{\beta} = -1 / \beta$$

п.о.с.

$$\beta K = 1$$

$$K_{\beta} \rightarrow \infty$$

*Специально организованная отрицательная обратная связь используется в усилителях для повышения качества передачи сигнала – расширения частотных характеристик, снижения выходного сопротивления и коэффициента нелинейных искажений*

Пример влияния о.о.с на частотную характеристику усилителя

усилитель с коэффициентом усиления  $K=1000$  на низких частотах, и имеющий частоту среза около 20кГц, охвачен отрицательной обратной связью с коэффициентом  $\beta=0,1$ .

$f$ Гц	$K$	$K\beta$
1	-1000	-9.90
10	-800	-9.88
100	-500	-9.80
1000	-100	-9.09
10000	-10	-5.00

# Операционные усилители : требования к ОУ

Коэффициент усиления должен составлять не менее  $10^3$  (как правило,  $10^4$ - $10^5$ ).

Минимальный входной ток (менее  $10^{-6}$ А)

полоса пропускания : 0 –( $10^4$ - $10^6$ ) Гц

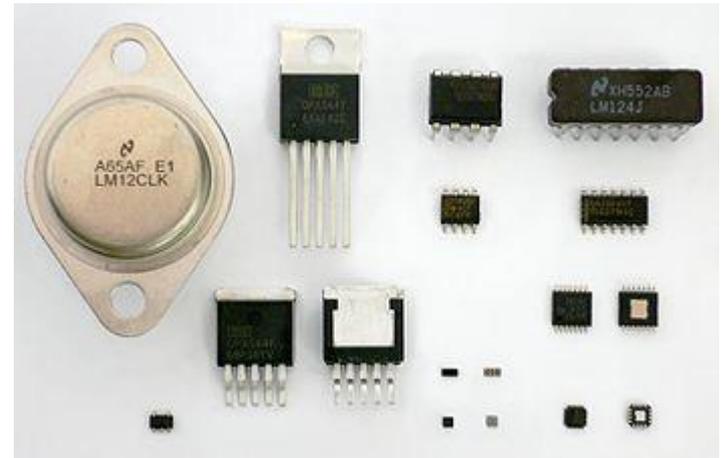
Схемотехническая реализация:

входы – инвертирующий и неинвертирующий.

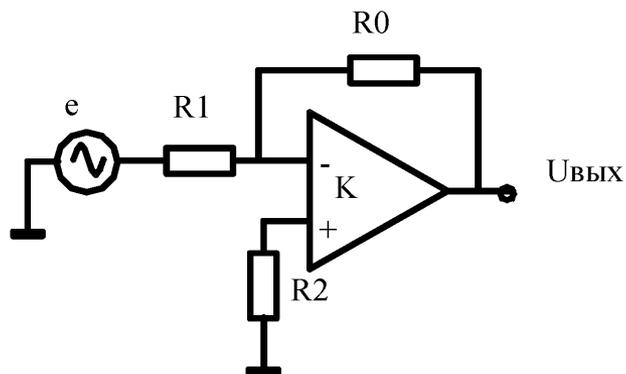
$u_{\text{ВЫХ}} = K(u_{\text{ВХ+}} - u_{\text{ВХ-}})$  , где K- коэффициент усиления без обратной связи,

$u_{\text{ВХ+}}$  - напряжение на неинвертирующем входе,  $u_{\text{ВХ-}}$  - напряжение на инвертирующем входе.

Одно из важнейших свойств ОУ – малый «дрейф нуля» – самопроизвольное изменение выходного напряжения при постоянстве входного. Как правило вызвано изменениями температуры. Измеряется в мкВ/градус



# Применение операционных усилителей



Инвертирующее звено на операционном усилителе

При  
 $i_{вх} \rightarrow 0$

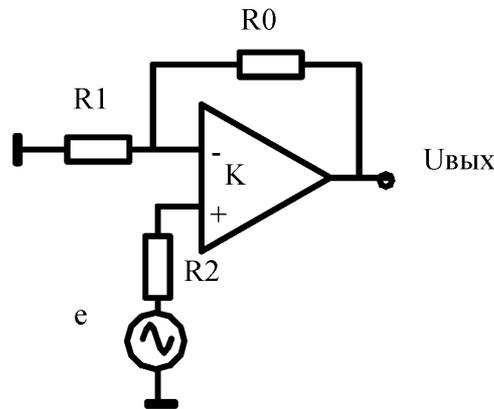
$$\frac{e - u_0}{R1} = -\frac{u_{вых} - u_0}{R0} \quad u_0 = -\frac{u_{вых}}{K}$$

При  $K \rightarrow \infty$   
 $u_0 \rightarrow 0$

$$u_{вых} = -e \frac{R0}{R1}, K_{\beta} = -\frac{R0}{R1}$$

Входное сопротивление инвертирующего звена равно  $R1$

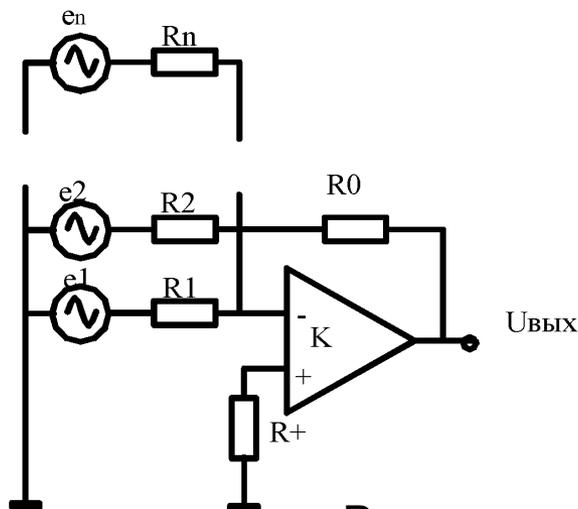
# Неинвертирующее звено на операционном усилителе



$$K(e - u_{\text{вых}} \frac{R1}{R1 + R0}) = u_{\text{вых}} \quad \text{При } K \rightarrow \infty \quad u_{\text{вых}} = e(1 + \frac{R0}{R1}), K_{\beta} = (1 + \frac{R0}{R1})$$

Реальный коэффициент усиления неинвертирующего звена может быть несколько выше теоретического, причина – влияние входных токов (для операционного усилителя на биполярных транзисторах).

## Суммирующее звено на ОУ

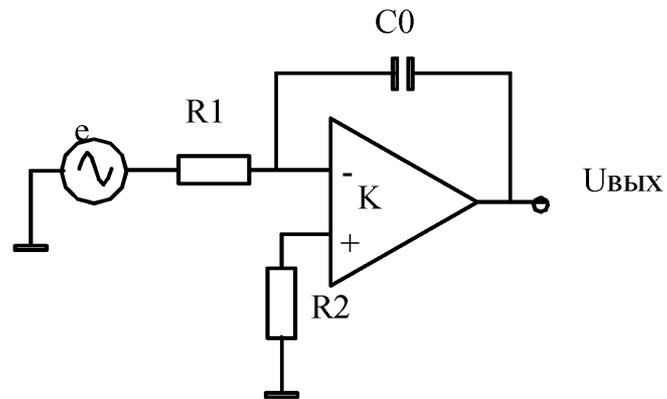


В частном случае равенства всех входных резисторов

$$u_{\text{вых}} = -\left(\frac{e_1}{R_1} + \frac{e_2}{R_2} + \dots + \frac{e_n}{R_n}\right)R_0$$

$$u_{\text{вых}} = -(e_1 + e_2 + \dots + e_n)R_0 / R_1$$

# Интегрирующее звено на ОУ



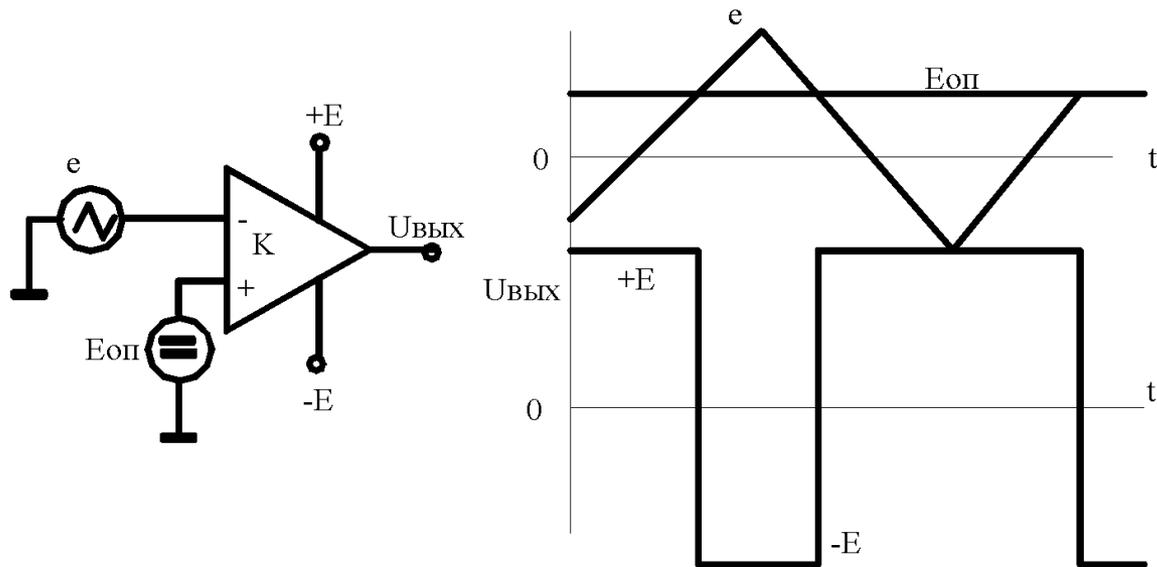
Из 1 закона  
Кирхгофа

$$\frac{e}{R1} = -C_0 \frac{du_{\text{вых}}}{dt}$$

При нулевых начальных  
условиях

$$u_{\text{вых}} = -\frac{1}{R1C_0} \int_0^t e dt$$

## Схема сравнения (компаратор) на ОУ



ОУ в режиме компаратора вырабатывает логический сигнал (уровень), знак которого определяется соотношением входных сигналов  $U_{ВЫХ} = E * \text{sgn}(E_{оп} - e)$

# Электронные генераторы

Генераторы гармонических колебаний

Генераторы импульсов

СНЧ  
0.01- 10Гц

ВЧ  
1-100МГц

НЧ  
10Гц-1000кГц

СВЧ  
100МГц-5ГГц

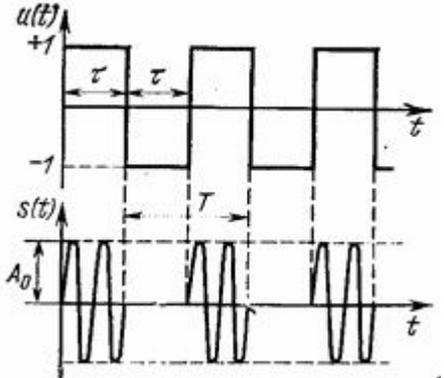
Генераторы периодически последовательностей импульсов

Генераторы моноимпульсов



Генераторы радио импульсов

Генераторы видео импульсов



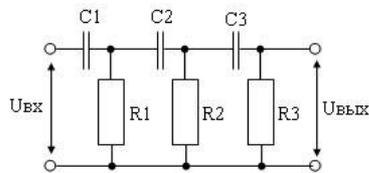
# Генераторы гармонических колебаний

Основной классификационный признак: тип используемой для возбуждения колебаний положительной обратной связи

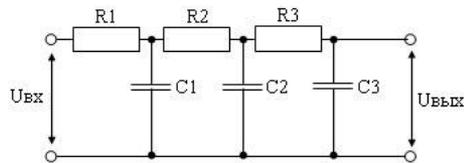
## RC

## LC

ФСЦ



а)

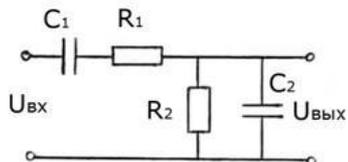


б)

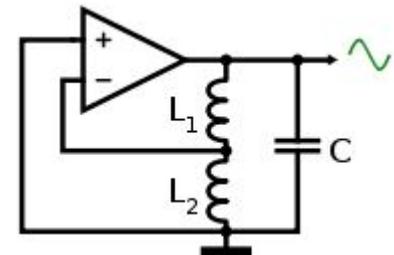
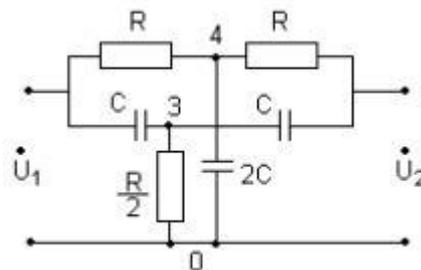
Трансформаторная обратная связь

Автотрансформаторная обратная связь («трехточка»)

Мост Вина



Двойной Т-мост



$$K_{\beta} = K / (1 - \beta K)$$

Условие возникновения гармонических автоколебаний:  
обращение в ноль знаменателя в формуле при заданной частоте

Распадается на  
два условия

Положительная о.  
с.(условие баланса  
фаз)

$$\varphi_k + \varphi_{\beta} = 0 \pm 2n\pi,$$

условие баланса  
амплитуд

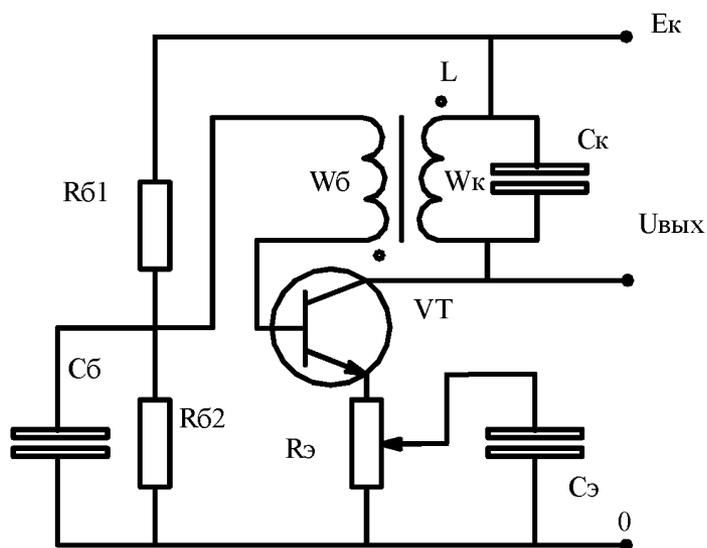
$$K \cdot \beta \geq 1$$

Пример генератора синусоидальных колебаний:  
LC – генератор с трансформаторной обратной  
связью. трансформатор выполняет две функции

1. вместе с конденсатором образует резонансный контур для выделения заданной частоты колебаний
2. Формирует сигнал положительной обратной связи, при этом нужный знак обратной связи определяется полярностью включения вторичной обмотки

# Принципиальная схема генератора

Для выполнения условия баланса амплитуд использован однокаскадный транзисторный усилитель с коллекторной нагрузкой в виде колебательного контура



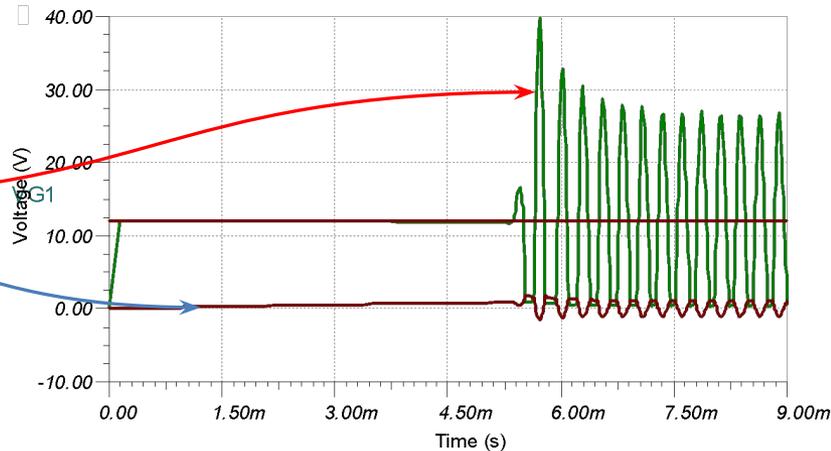
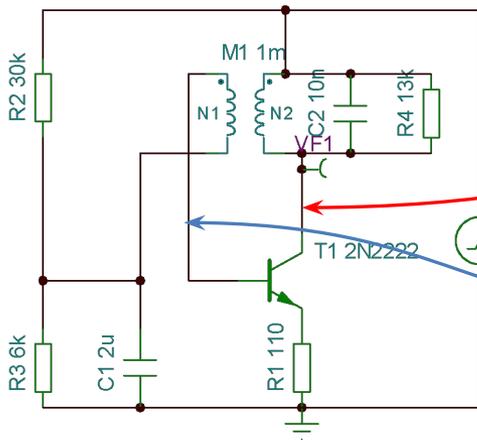
Резонансная частота контура  $C_k W_k$ .

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

На резонансной частоте достигается максимум коэффициента усиления

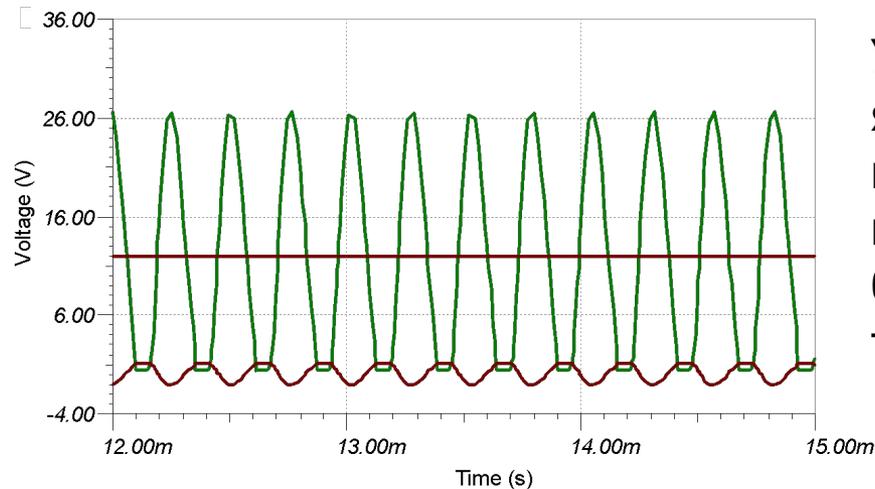
Влияние обмотки в цепи базы на частоту мало, так как она имеет малое число витков и замкнута на относительно высокое входное сопротивление усилительного каскада

# Результаты моделирования процессов в LC-генераторе в программе Tina-TI



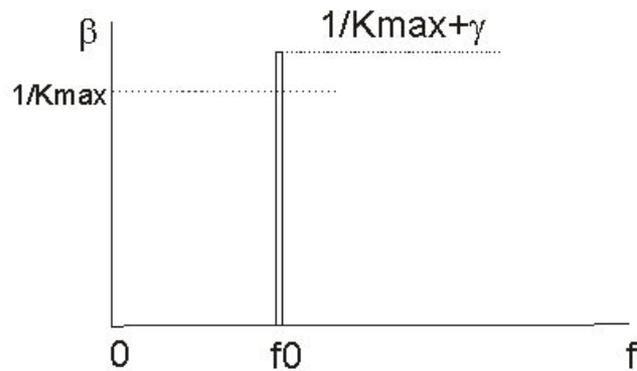
Переходный процесс при включении питания (U VG1) и напряжение на коллекторе

L1 – 1мГн  
L2 -144мГн  
M12 – 12мГн (K=1)  
C=10нФ  
Расчетная частота  
4.2кГц (T=0.24мс)



Установившийся режим: напряжения на коллекторе и базе транзистора

# Оценка влияния избыточного коэффициента положительной обратной связи $k\beta > 1$



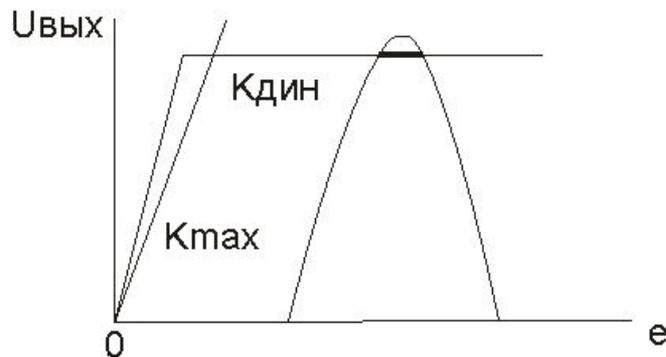
В реальном процессе условие  $k\beta = 1$  выполнится автоматически за счет снижения  $K$  вследствие выхода из линейного режима

## Пример

$$K_{\max} = 10 \quad \gamma = 0.01 \quad \beta = 0.11$$

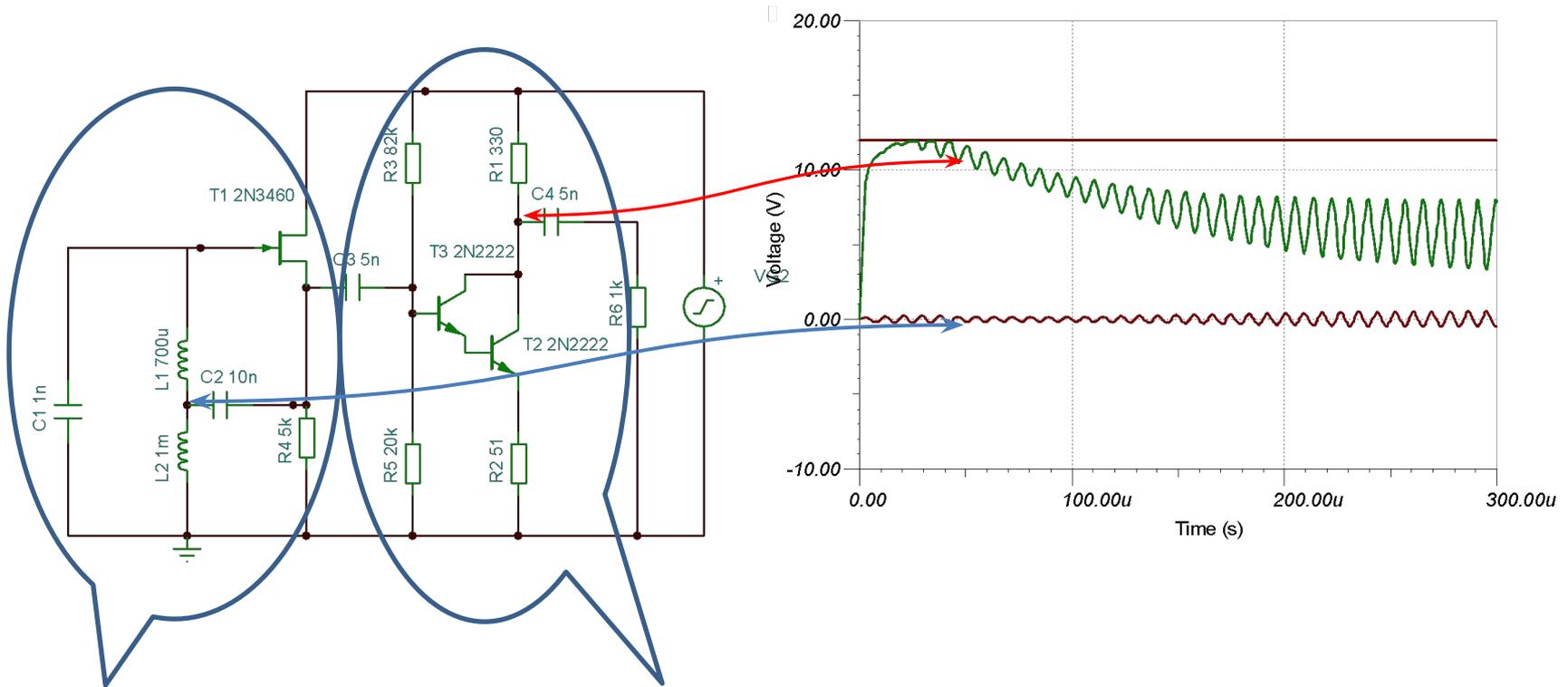
$$1 / (K_{\max} + \gamma) * K_{\text{дин}} = 1$$

$$K_{\text{дин}} = K_{\max} / (1 + K_{\max} * \gamma) \approx 9.1$$



Результатом восстановления баланса амплитуд является появление искажений синусоиды

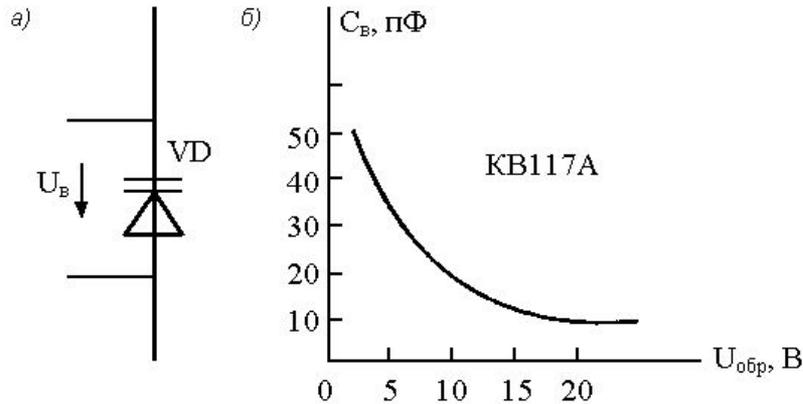
# LC-генератор с автотрансформаторной обратной связью (индуктивная трехточка)



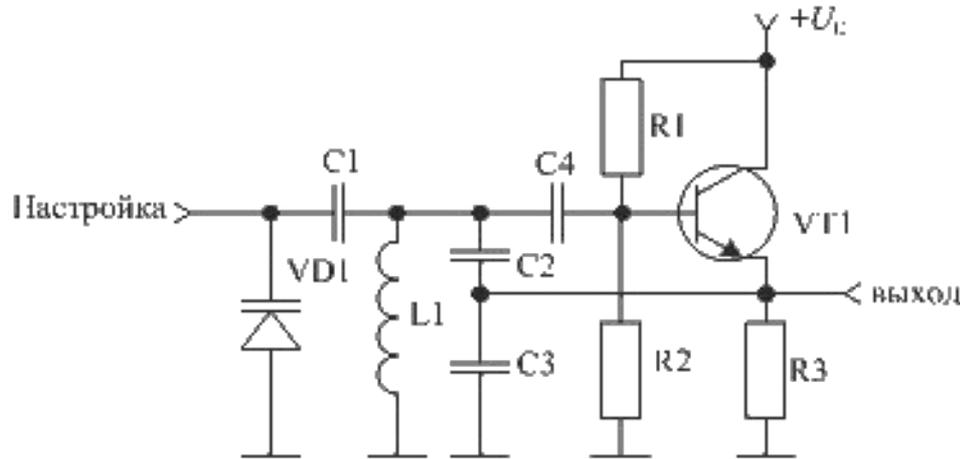
Задающий генератор  
на полевом  
транзисторе

Согласующий каскад на биполярном  
составном транзисторе (схема  
Дарлингтона)

# Регулировка частоты генератора с помощью варикапа

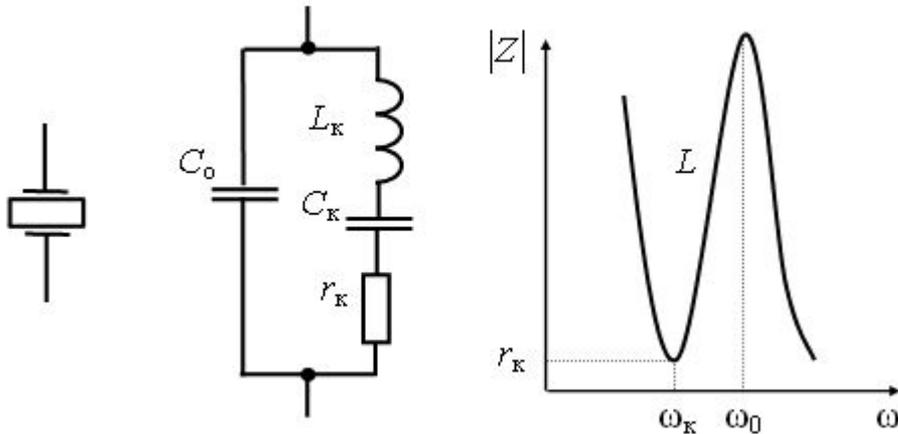


Зависимость ёмкости варикапа от обратного напряжения



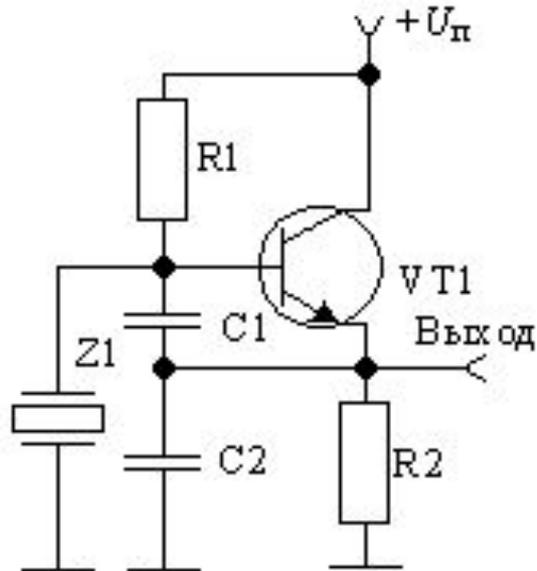
Ёмкостная трехточка с подстройкой частоты

# Стабилизация частоты генерации с помощью кварцевого резонатора



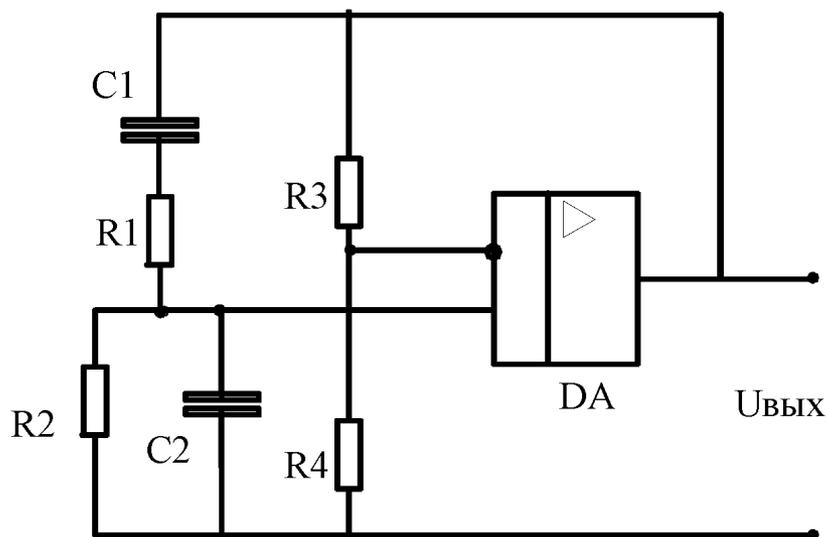
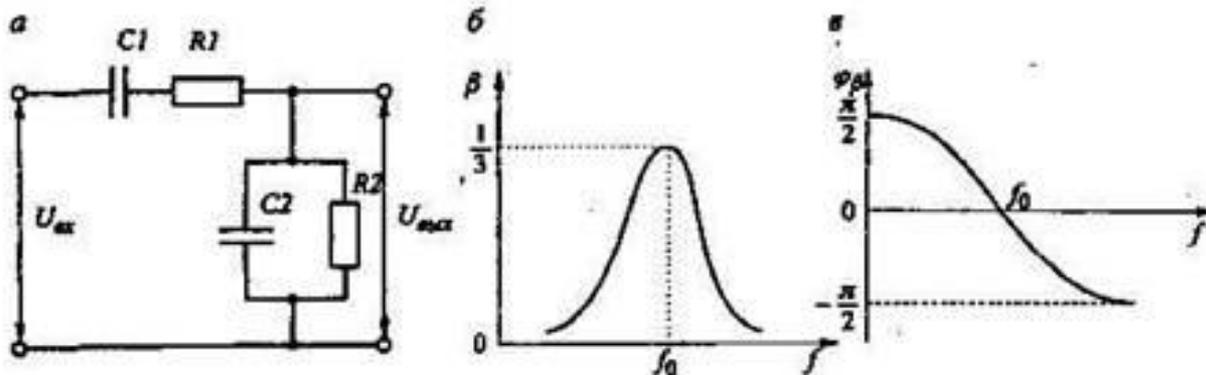
Эквивалентная схема и частотная характеристика кварцевого резонатора

Типичные параметры для кварца с частотой 4 МГц:  
*Добротность*  $Q=25000$   
 $L_K = 100$  мГн,  $C_K=0,015$  пФ,  $r_K = 100$  Ом  $C_0 - 1...10$  пФ  
 $\omega_K$  – частота последовательного резонанса  
 $\omega_0$  – частота параллельного резонанса



Ёмкостная трехточка с кварцевым резонатором вместо индуктивности.

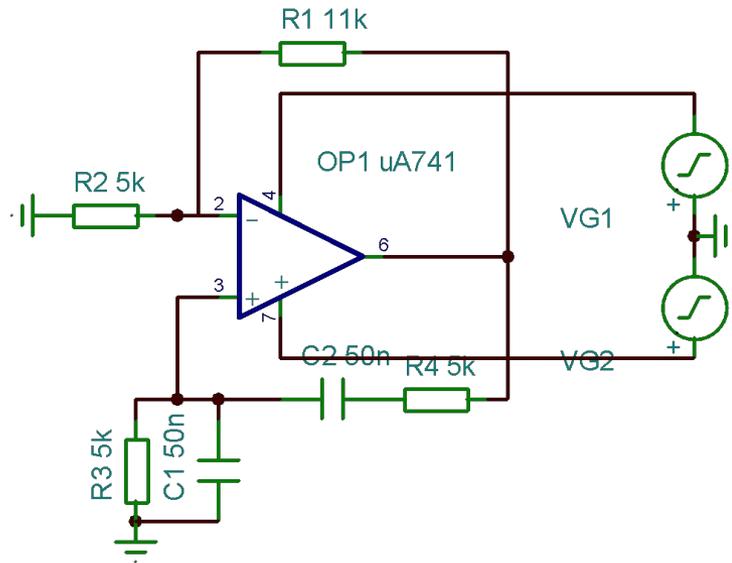
# Пример RC-генератора: Генератор с мостом Вина на операционном усилителе



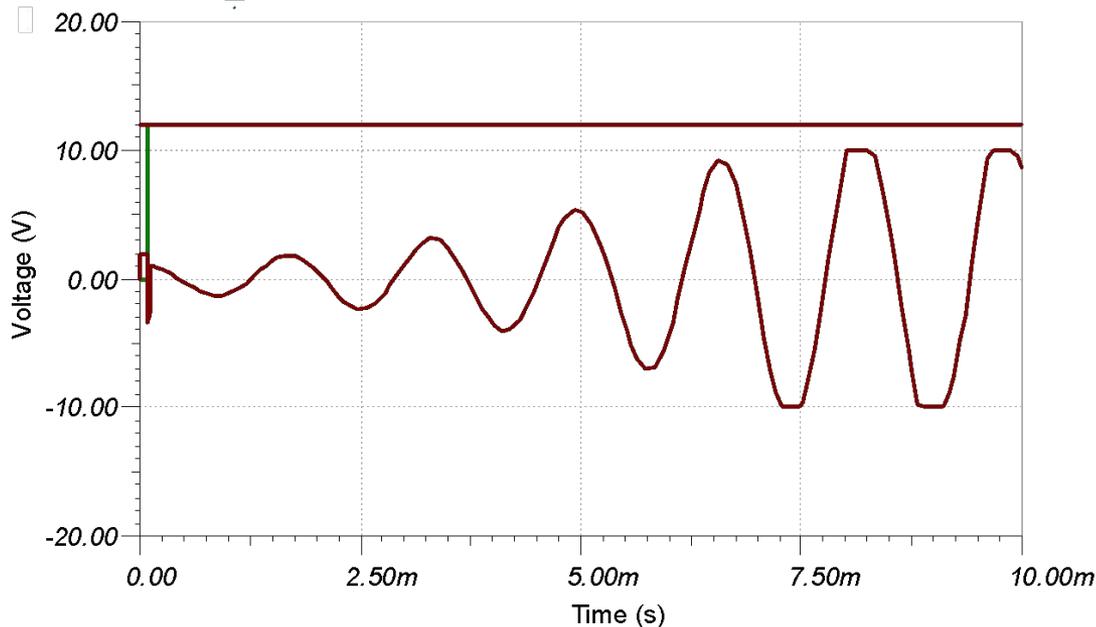
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{R1 \cdot R2 \cdot C1 \cdot C2}}$$

Если  $R1=R2=R$ ;  $C1=C2=C$   $f=1/(2\pi RC)$ .  
 $R3/R4=2$ ,  $K=(R3/R4)+1=3$

# Результаты моделирования процессов в RC-генераторе в программе Tina-TI

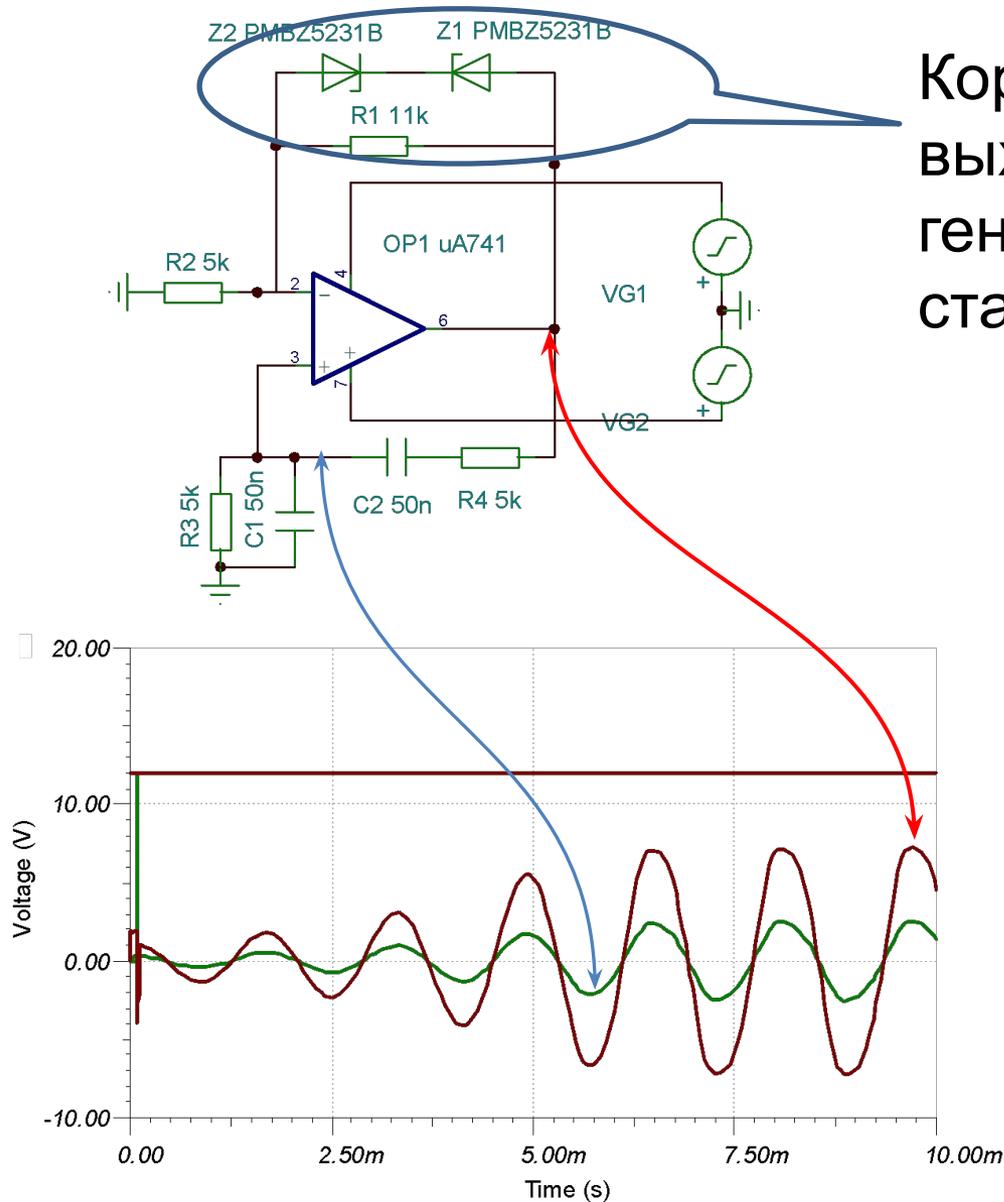


ОУ широкого  
применения  
 $K_0=200000$   
 $R_{вх}=2\text{МОм}$   
 $R_{вых}=75\text{ Ом}$   
 $f_{гр}=1\text{МГц}$

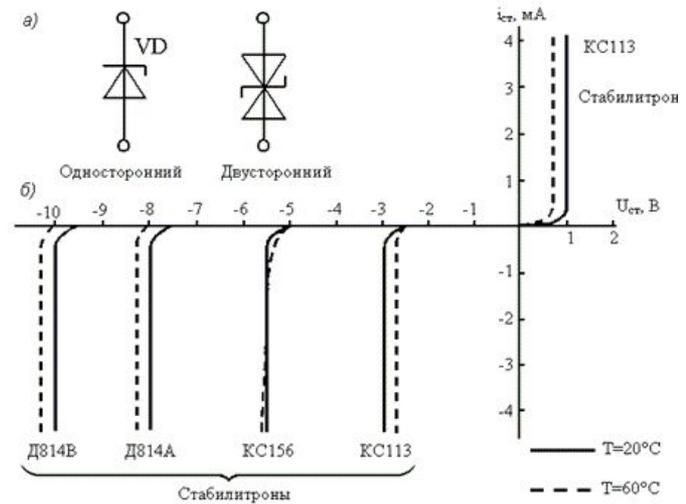


Переходный процесс  
при включении  
питания

При моделировании  
для запуска колебаний  
необходимо задать  
некоторый временной  
интервал между  
включением  
источников питания



Коррекция формы  
выходного напряжения  
генератора с помощью  
стабилитронов



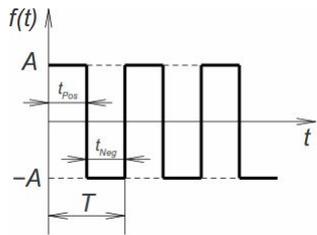
Вольт-амперные  
характеристики  
стабилитронов

# Генераторы импульсов

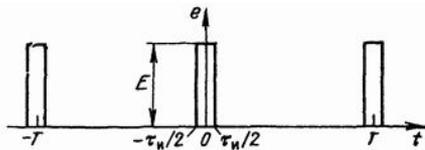


Генераторы прямоугольных импульсов

Мультивибраторы

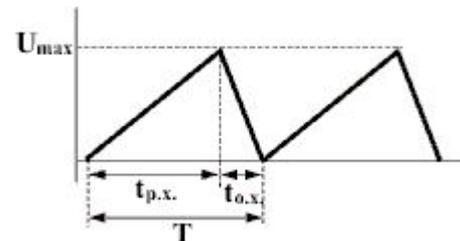


Блокинг-генераторы

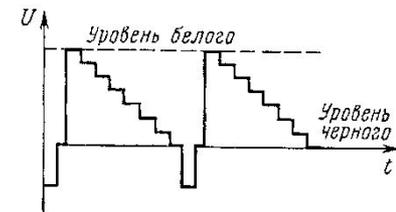


Генераторы импульсов специальной формы

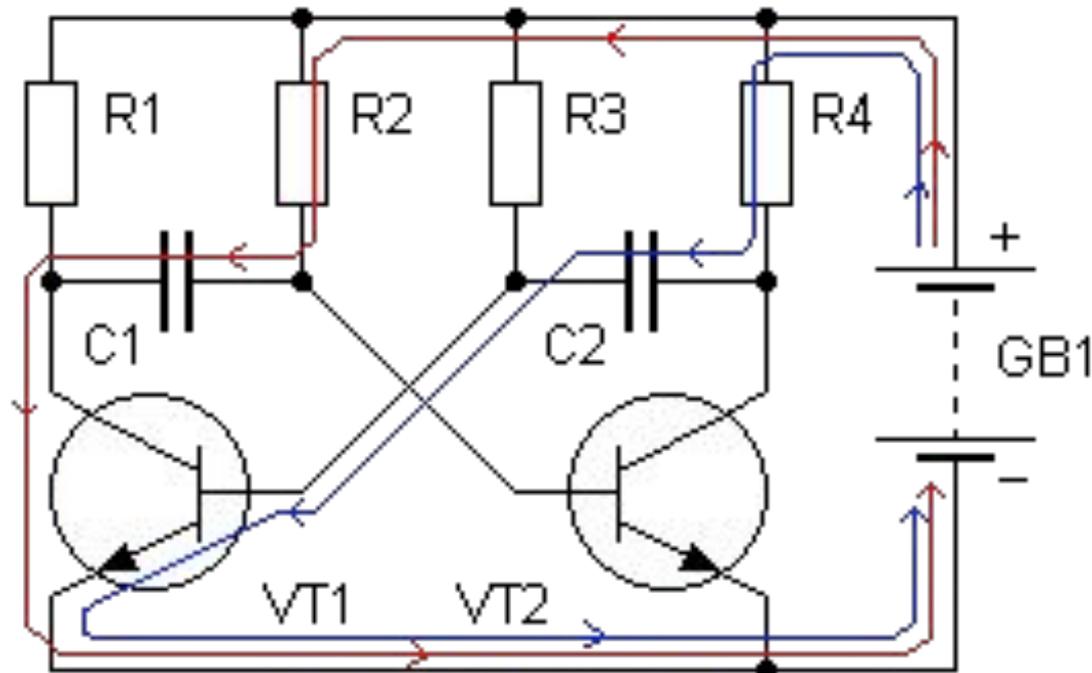
Генераторы линейно изменяющихся напряжений и токов



Генераторы ступенчатого напряжения



## Классический мультивибратор на дискретных элементах



Может рассматриваться как двухкаскадный усилитель со 100% п.о.с

быстрый заряд C2  
медленный перезаряд C1

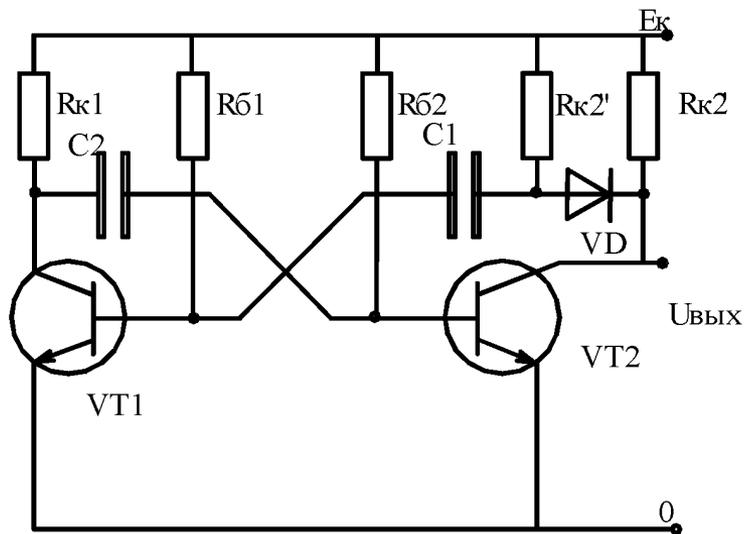
Частота генерируемых импульсов

определяется нижней частотой полосы пропускания усилителя  $f \approx 1/R_6C$

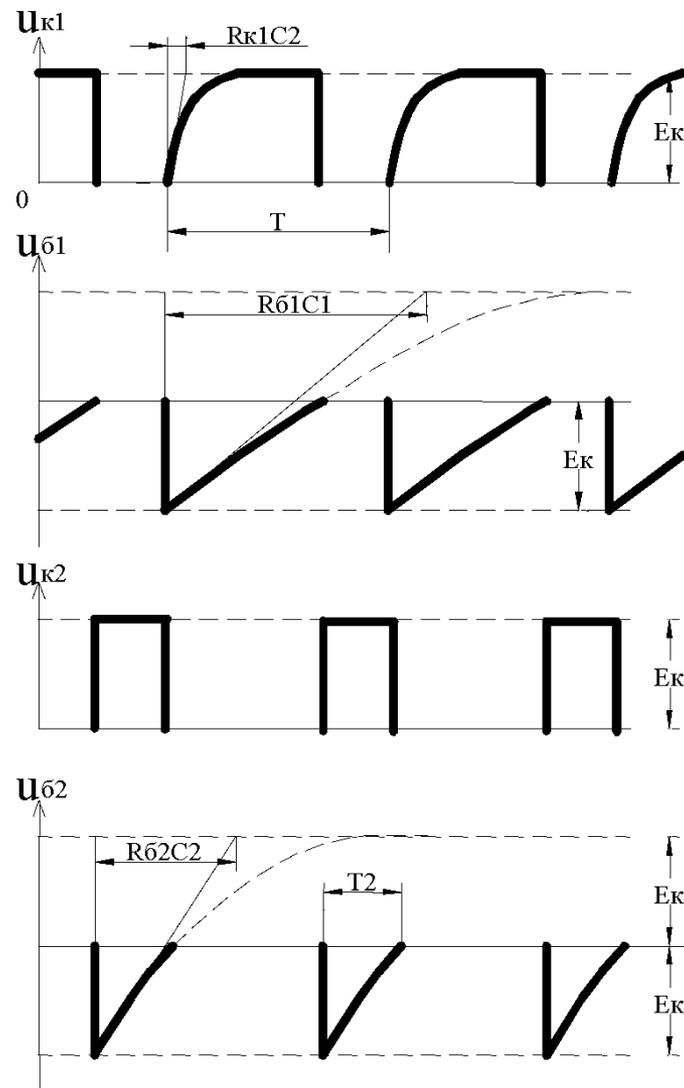
Амплитуда близка к напряжению питания

Потери энергии в транзисторах минимальны из за быстрого перехода из состояния отсечки к насыщению

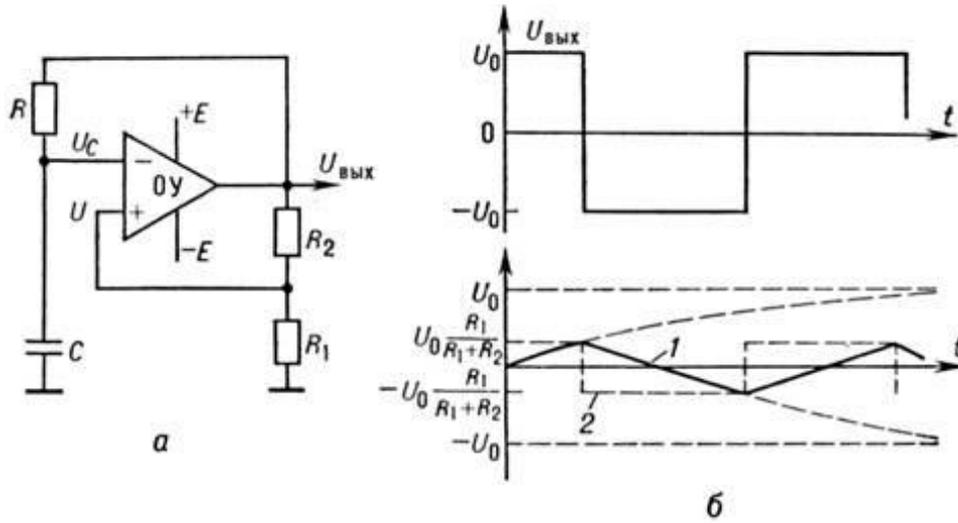
# Мультивибратор с улучшенной формой импульса



$$T = (C_1 R_{б1} + C_2 R_{б2}) \ln 2$$



# Мультивибратор на ОУ



$R_2, R_1$  – положительная о.с.     $RC$  – времязадающая отрицательная о.

С.  
К

ается быстродействием ОУ

Несимметричный мультивибратор на ОУ

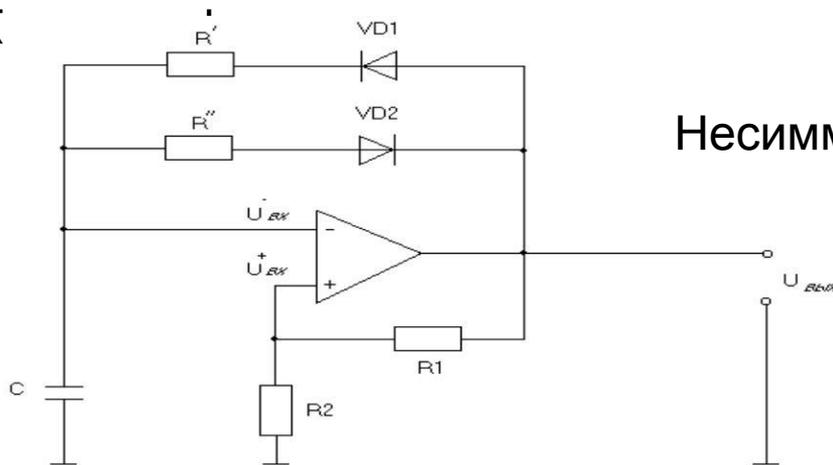
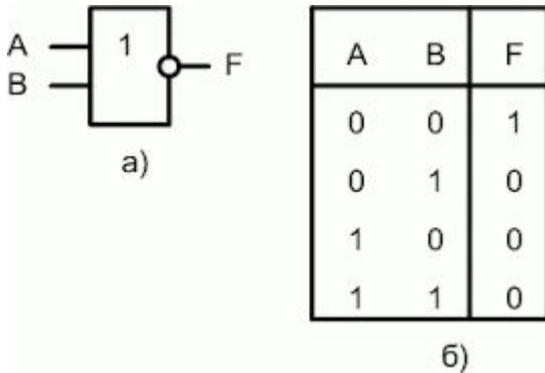


Рис.1

# Мультивибратор на логическом элементе



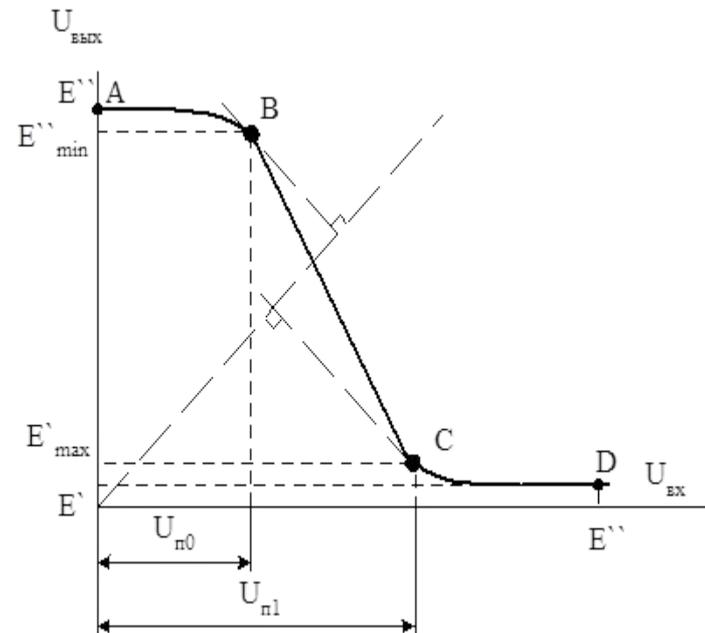
Пример: элемент 2И-НЕ

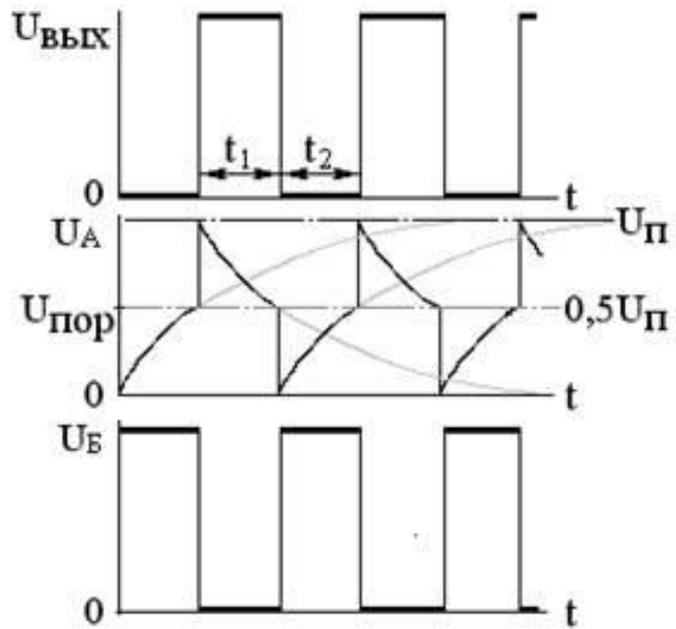
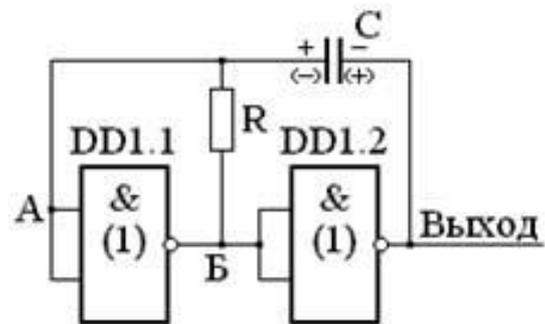
Отличия логического элемента от ОУ: резкая нелинейность амплитудной характеристики, высокая скорость переключения

Логический «0» 0-1В

Логическая «1» 3.5-5 В

Порог срабатывания 0.5-0.7 В

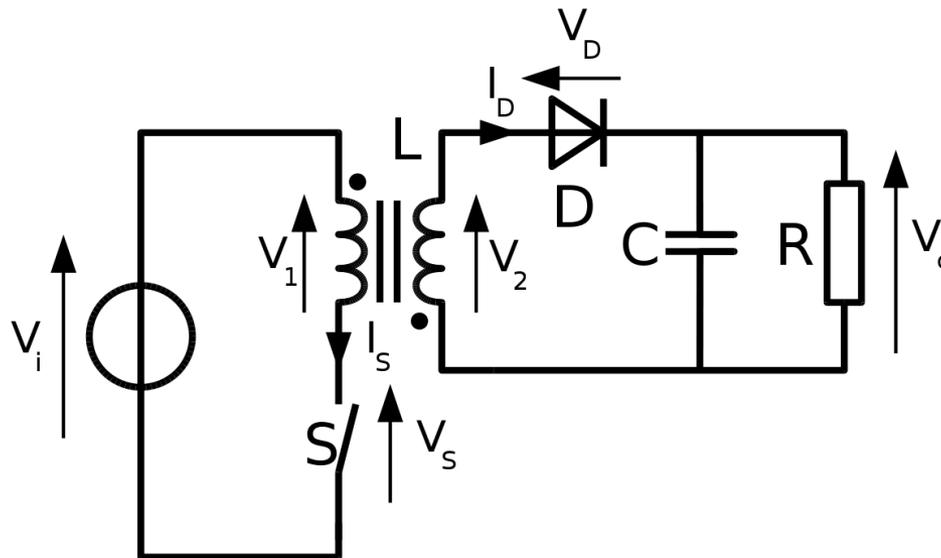




Для получения стабильной частоты вместо  $C$  используется кварцевый резонатор

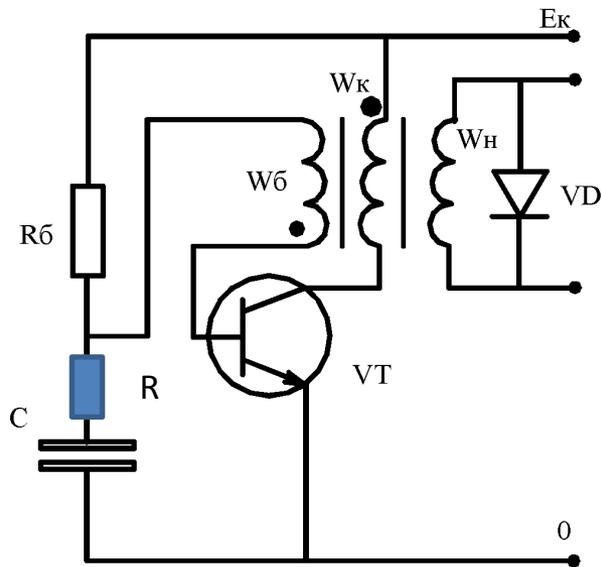
# Блокинг-генератор

В основу работы положен принцип накопления энергии в индуктивности с последующим её сбросом в нагрузку «обратноходовой преобразователь»

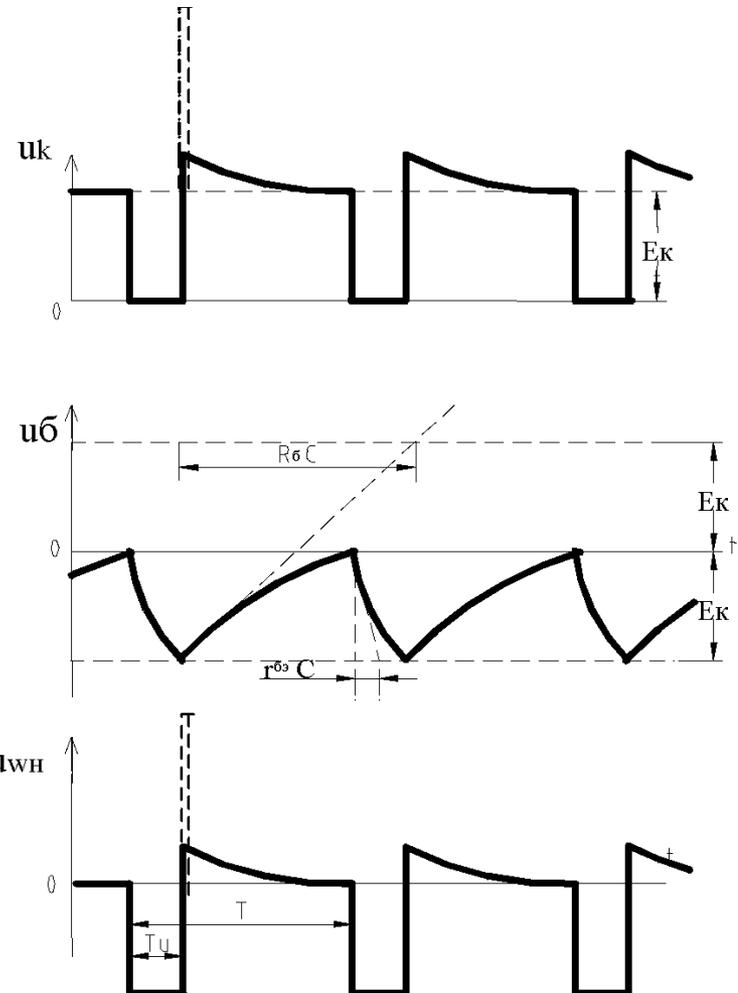


Ключ  $S$  замыкается на короткое время, за которое ток в первичной обмотке нарастает. При размыкании ключа накопленная в сердечнике энергия передается в нагрузку

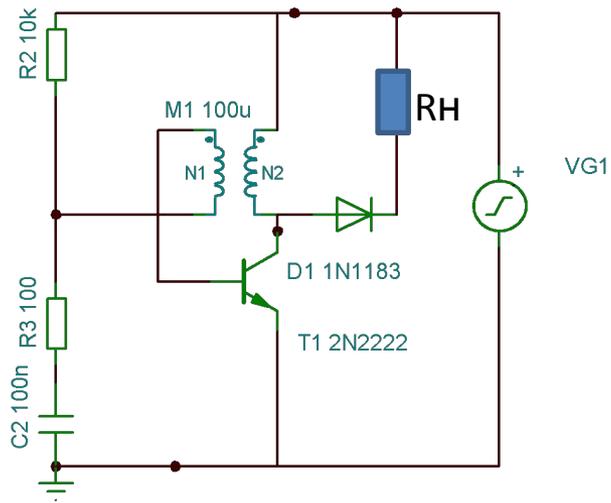
# Автоколебательный обратногоходовой преобразователь – блокинг генератор



За формирование длительности импульса отвечает постоянная времени  $\tau_{бэ}C$ , длительности паузы  $-RбC$

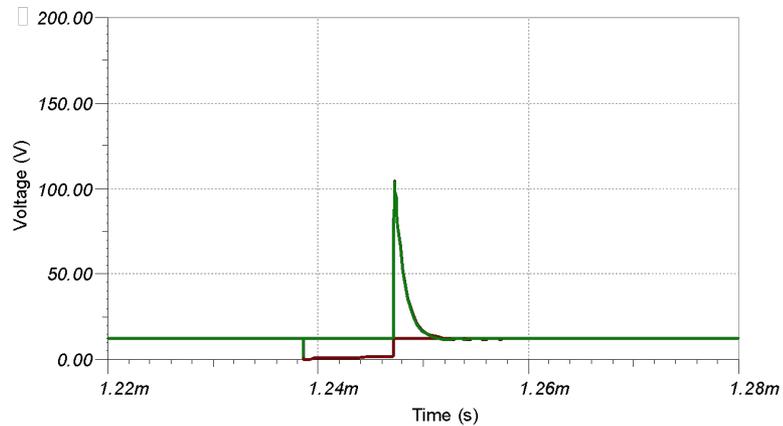
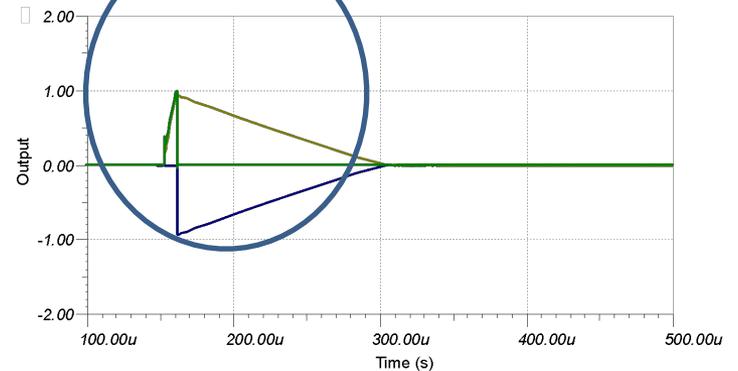
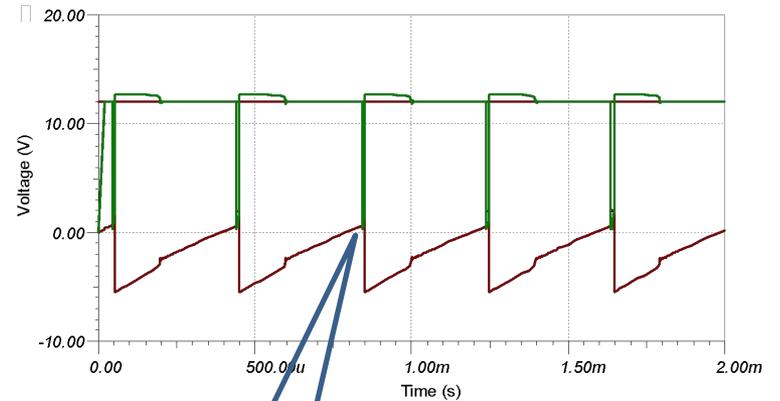


# Компьютерная модель блокинг генератора



$RH=0$

## Напряжения на коллекторе и базе



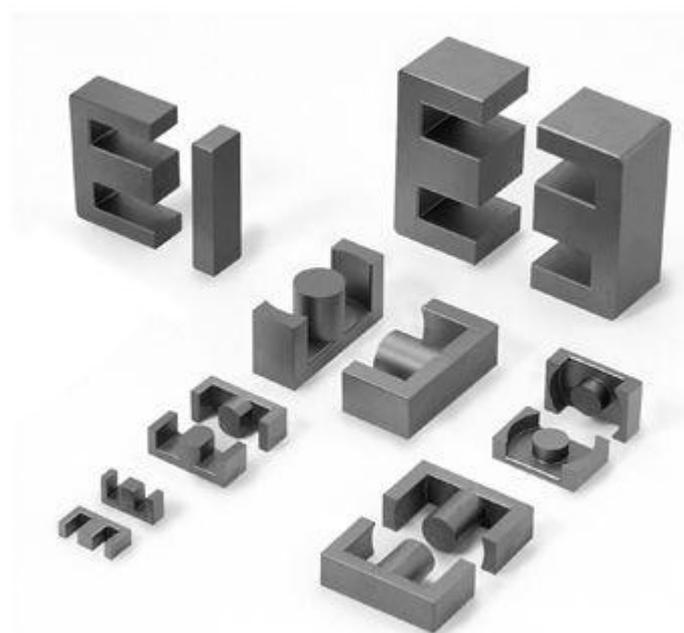
$RH=100 \text{ Ohm}$

## Токи в эмиттере, катушке и диоде

# Работа ферромагнитных элементов блокинг-генератора

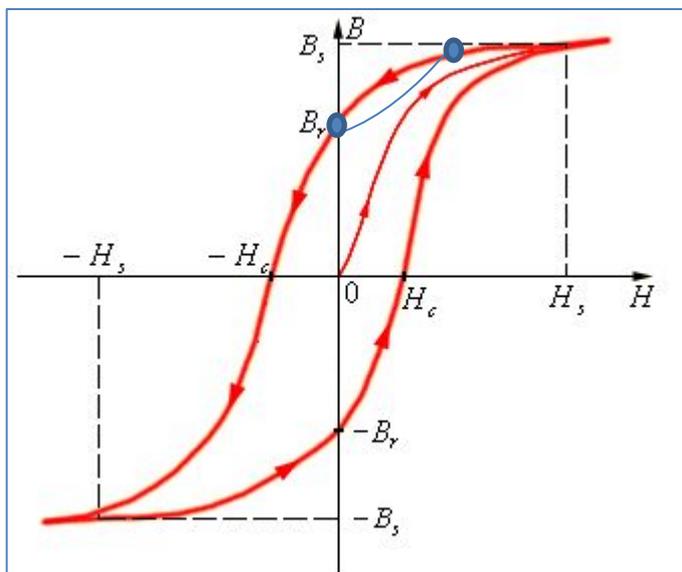


Импульсный трансформатор на тороидальном ферритовом сердечнике

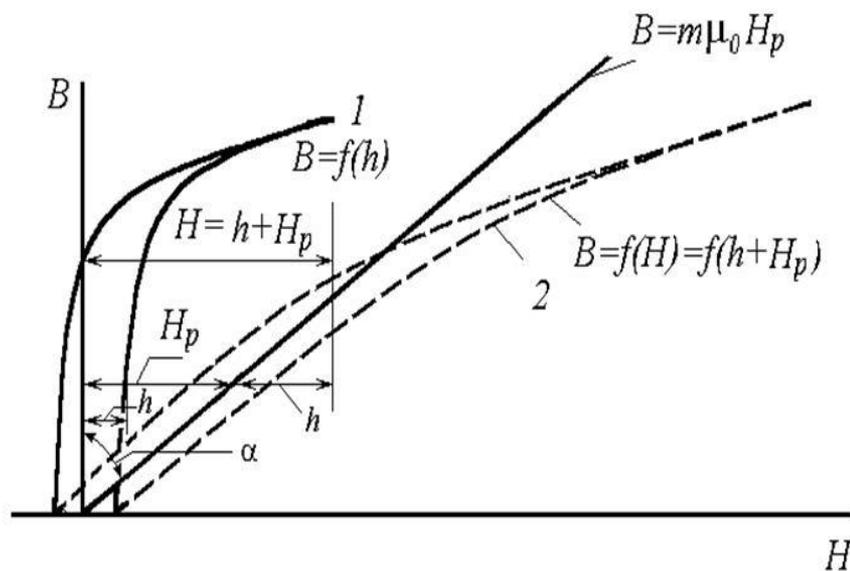


типовые ферритовые сердечники

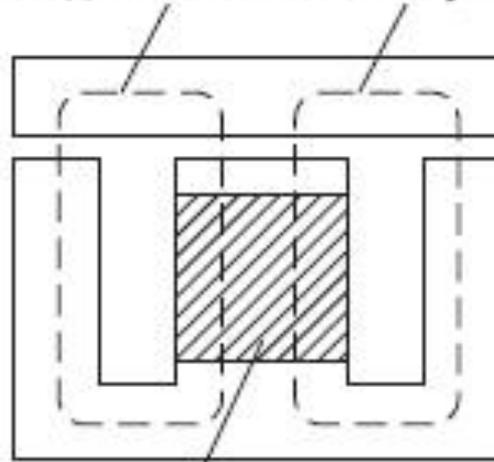
## Униполярное намагничивание сердечника без зазора



## Влияние зазора на петлю гистерезиса



Средняя длина магнитного пути, см



Зазор, см

Сечение сердечника, см<sup>2</sup>

$$L = \frac{w^2}{R_{\text{м.ст}} + R_{\delta}} = \frac{w^2}{l_{\text{м}} / (\mu S_{\text{м}}) + 2\delta / (\mu_0 S_{\delta})} \quad L \approx w^2 / R_{\delta} = \mu_0 w^2 S / (2\delta)$$