Литература:

1. Опадчий Ю.Ф и др.
Аналоговая и цифровая электроника (Полный курс): Учебник для ВУЗов / Ю.Ф. Опадчий, О.П. Глудкин, А.И. Гуров; Подред. О.П. Глудкина. – М.: Горячая линия – Телеком, 2002. – 768с.: ил.

2. Колонтаєвський Ю.П., Сосков А.Г.
Промислова електроніка та мікросхемотехніка: теорія і практикум. За ред. А.Г. Соскова. – К.: Каравела, 2003. – 368с.

3. Лагин В.И., Савелов Н.С.
Электроника: Учеб. пособие. 4-е изд. – Ростов н/Д: изд-во «Феникс», 2004. – 576с.

4. Расчет электронных схем. Примеры и задачи: Учеб. пособие для вузов по спец. электрон. техники / Г.И. Изъюрова, Г.В. Королев, В.А. Терехов и др. – М.: Высш. шк., 1987. – 355с.: ил.

5. Полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы. / Ящынин В.И., Бурдукова С.С. – Х.: Вища шк. Изд-во при Харьков. ун-те, 1985. – 232с.

6. Гутников В.С.
Интегральная электроника в измерительных устройствах. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленинград. отд-е, 1988. – 304с.: ил.

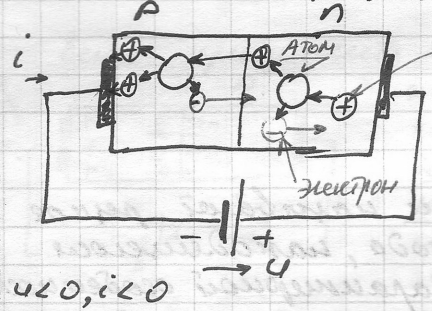
7. Щербаков В.И., Грездов Г.И.
Электронные схемы на операционных усилителях: Справочник. – К.: Техніка, 1983. – 213с.

8. П. Хоровиц, У. Хилл Искусство схемотехники М.: Мир, 2003. – 700с.

фект - явление прохождения электронов сквозь потенциальный барьер.



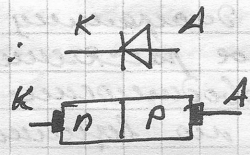
Лавинный пробой. Механизм лавинного пробоя подобен механизму ударной ионизации в газах.



Лавинный пробой возникает, если при движении до очередного соударения с атомом дырка (или электрон) приобретает энергию, достаточную для ионизации атома. Расстояние, которое проходит носитель заряда до соударения называют длиной свободного пробега.

Тепловой пробой. Увеличение тока при тепловом пробое объясняется разогревом полупроводника в области p-n перехода и соответствующим увеличением удельной проводимости. Тепловой пробой характеризуется отрицательным дифференциальным сопротивлением. Если полупроводник кремний, то при увеличении обратного напряжения тепловой пробой обычно возникает после электрического (во время электрического пробоя полупроводник разогревается, а затем начинается тепловой пробой). После электрического пробоя p-n переход не меняет своих свойств. После теплового пробоя, если полупроводник успел нагреться достаточно сильно, свойства перехода необратимо меняются (и прибор выходит из строя).

Обозначение диода:



Технологии производства полупроводниковых диодов:
- Точечный диод;
- Плоскостной сплавной диод;
- Диффузионный диод.

Классификация диодов. Перв. Материал:
1 или Г – германиевый;
2 или К – кремниевое;
3 или А – соединения галлия;
4 или И – соединения индия.

Назначение:
- выпрямительный;
- импульсный;
- СВЧ;
- стабилитрон, стабистор;
- варикап и т. д..

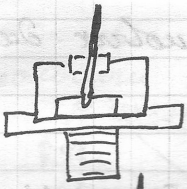
Принцип действия:
- лавинно-пролетный;
- Туннельный;
- Диод Шотки;
- импульсный;
- Фотодиод;
- Диод Ганна.

Для выпрямительных диодов:
По мощности:
- маломощные: $I_{пр\ ср\ max} \leq 0,3$ А;
- средней мощности: $I_{пр\ ср\ max} = 0,3 \div 10$ А;
- большой мощности: $I_{пр\ ср\ max} > 10$ А

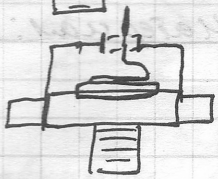
По частоте:
- низкочастотные: $f_{max} < 10^3$ Гц;
- высокочастотные: $f_{max} > 10^3$ Гц.

Основные параметры выпрямительных диодов:
$I_{пр\ ср\ max}$ – максимальное (за период входного напряжения) значение среднего прямого тока диода;
$U_{обр\ доп}$ – допустимое наибольшее значение постоянного обратного напряжения;
f_{max} – максимально-допустимая частота входного напряжения.

Конструкция точечного диода



Конструкция плоскостного диода.



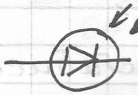


- диод


- стабилитрон и стабистор


- варикап

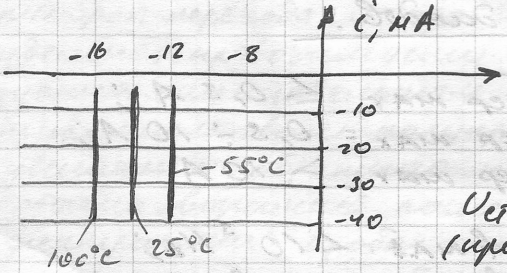

- светодиод


фотодиод.


- диод Шотки.

Разновидности диодов:

Стабилитрон - полупроводниковый диод, смещенный для работы в режиме электрического пробоя. В указанном режиме при значительном изменении тока стабилитрона, напряжение изменяется не значительно



ВАХ стаб-на Д814Д.

Основные параметры:

$U_{ст}$ - напряжение стабилизации (при заданном токе в режиме пробоя)

$I_{ст\,мин}$ - минимально допустимый ток стабилиз.

$I_{ст\,max}$ - максимально допустимый ток стабилиз.

$r_{ст}$ - дифференциальное сопротивление стаб-на на участке пробоя, $r_{ст} = \frac{dU}{dI}$

$\Delta U_{ст}$ (ТКН) - температурный коэффициент напряжения стабилизации.

Δ_{Ucm} – отношение относительного изменения напряжения стабилизации к абсолютному изменению температуры окружающей среды.

Пусть при t_1 – напр-е $U_{ст1}$ и
при t_2 – напр-е $U_{ст2}$, тогда

$$U_{ст2} = U_{ст1} + U_{ст1} \cdot \Delta U_{ст} (t_2 - t_1)$$

Стабилитрон включается в цепь в обратном направлении и имеет диапазон стабилизирующих напряжений от 3 до 180 V; стабистор включается в прямом направлении, и диапазон 0,6 ÷ 5 V.

Диод Шотки – использует не p-n переход, а выпрямляющий контакт металл полупроводник. При работе диода Шотки отсутствует инжекция неосновных носителей заряда и соответствующие явления накопления и рассасывания, поэтому эти диоды очень быстродействующие ($f_{max} \approx 1$ ГГц) и имеют малое прямое напряжение ($U = 0,5$ V)

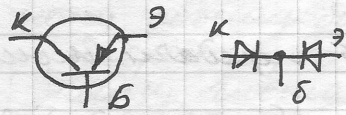
1.3. Биполярные транзисторы.

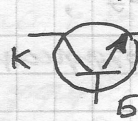
Биполярный транзистор (БТ) – полупроводниковый прибор с двумя взаимодействующими выпрямляющими электрическими переходами и тремя слоями выводами, усилительные свойства которого обусловлены явлениями инжекции и экстракции неосновных носителей заряда.

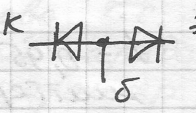
В БТ используется одновременно два типа носителей зарядов: электроны и дырки.

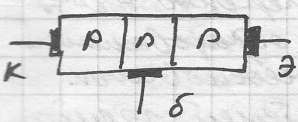
Различают транзисторы типов:

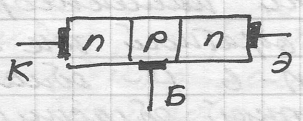
p – n – p и n – p – n

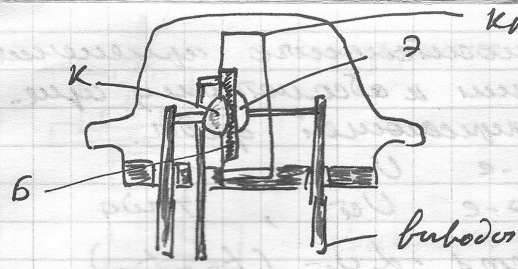








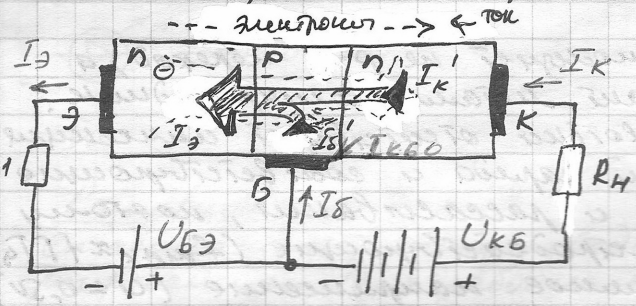




Конструкция БТ

Переход эмиттер - база называют эмиттерным, а коллектор - база - коллекторным.

Приложим к эмиттерному переходу прямое ($U_{БЭ}$), а к коллекторному - обратное ($U_{КБ}$) напряжения. В результате через эмиттерный переход в



область базы будут инжектировать электроны (инжекцией дырок из области базы пренебрегаем), образуя эмиттерный ток транзистора - $I_Э$. Поток электронов обеспечивающих ток $I_Э$ - красного цвета.

Часть инжектированных в область базы электронов рекомбинирует с основными для этой области носителями заряда — дырками, образуя ток базы $I_Б'$. Другая часть инжектированных электронов, которая достигает коллекторного перехода с помощью электрического поля, созданного $U_{КБ}$, экстрактируется во вторую n - область транзистора - коллектор, образуя коллекторный ток $I_К'$. Уменьшение потока электронов через коллекторный переход коллекторного тока) можно оценить как:

$$I_К' = \alpha I_Э ,$$

где $\alpha = 0{,}95 \div 0{,}99$ - коэффициент передачи тока эмиттера.

Через закрытый коллекторный переход будет образовываться обратный ток $I_{КБО}$, образованный потоком из n - в p - область неосновных для коллекторной области носителей заряда —

дырок, который вместе с током $I_к'$ образует выходной ток транзистора:

$$I_к = I_к' + I_{кБО}$$ и ток в базовом выводе

$$I_б = I_б' - I_{кБО}$$ или

$$I_к = \alpha I_э + I_{кБО}$$

Учитывая, что $I_э >> I_{кБО}$ можно использовать соотношение:

$$I_к \approx \alpha I_э$$

Разность между эмиттерным и коллекторным токами в соответствии с I-м законом Кирхгофа представляет собой базовый ток:

$$I_б = I_э - I_к.$$

Сделаем замену: $I_э = I_к / \alpha$, тогда

$$I_б = \frac{I_к}{\alpha} - I_к = I_к \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \right),$$ откуда

$$\frac{I_к}{I_б} = \frac{\alpha}{1-\alpha} = \beta$$ – динамический коэффициент передачи тока базы, $\beta >> 1$.

$$I_к = \beta I_б$$

Из последнего выражения видно, что транзистор представляет собой управляемый элемент.

Основные свойства транзистора определяются процессами в базе. Если концентрация примесей по всему объему базового слоя одинакова т.е. база однородна, то движение носителей заряда в ней носит чисто диффузионный характер, а такие БТ называются диффузионными.

Если база неоднородна, то за счет образовавшегося в ней электрического поля, движение носителей будет комбинированным: диффузия

сочетайся с дрейфом носителей заряда, а БТ — называются дрейфовыми.

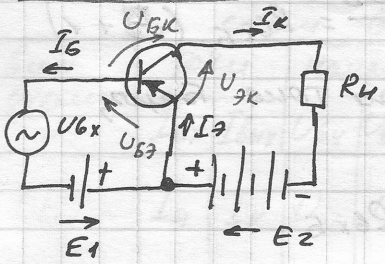
Сопротивление обратно включенного коллекторного перехода очень велико (МОм). Поэтому в цепь коллектора можно включать нагрузочные резисторы с большими сопротивлениями, не изменяя значения коллекторного тока. Соответственно в цепи нагрузки будет выделяться значительная мощность. Сопротивление прямо смещенного эмиттерного перехода очень мало (10.. Ом). Поэтому при почти одинаковых коллекторном и эмиттерном токах мощность потребляемая в цепи эмиттера существенно меньше мощности в цепи нагрузки. (т.е. БТ усиливает мощность).

Малое значение входного напряжения (прямое смещение эмиттерного перехода) и большие значения выходного напряжения (обратное смещение коллекторного перехода) указывают на БТ усиливает напряжение.

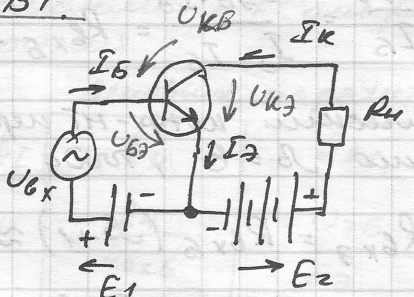
Режимы работы БТ:

1. Нормальный или активный режим — на эмиттерный переход подано прямое напряжение, а на коллекторный — обратное. Режим обеспечивает максимальное значение коэффициента передачи тока эмиттера и минимальное искажение усиливаемого сигнала
2. инверсный режим — к коллекторному переходу подведено прямое напряжение, а к эмиттерному - обратное. Очень маленький коэффициент передачи тока эмиттера.
3. Режим двойной инжекции или насыщения — оба перехода находятся под прямым напряжением. Выходной ток определяется только параметрами нагрузки. Используется для замыкания цепей передачи сигнала.
4. Режим отсечки — к обоим переходам подведено обратное напряжение. Выходной ток практически отсутствует, используется для размыкания цепей передачи сигналов.

Схемы включения БТ.

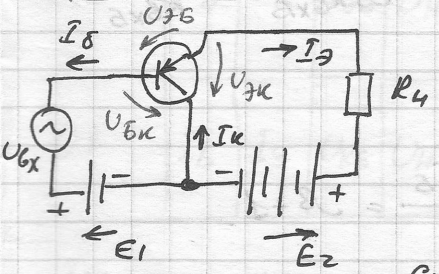


p-N-p



N-p-N

Схема включения ОЭ



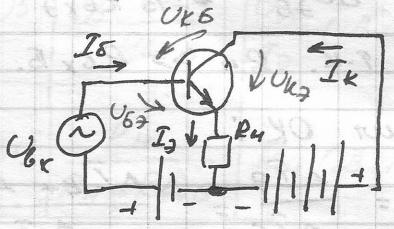


Схема включения ОК.

Основными параметрами, характеризующими транзистор как активный нелинейный четырехполюсник, являются коэффициенты усиления:

- по току: $k_I = \frac{\Delta I_{вых}}{\Delta I_{бх}}$;
- по напряжению: $k_U = \frac{\Delta U_{вых}}{\Delta U_{бх}}$;
- по мощности $k_P = k_I k_U = \frac{\Delta P_{вых}}{\Delta P_{бх}}$,

а также:

- входное сопротивление: $R_{вх} = \frac{U_{бх}}{I_{бх}}$
- выходное сопротивление: $R_{вых} = \frac{U_{вых}}{I_{вых}}$

Приведем расчет параметров для схем ОЭ и ОК.

$$k_{I_Э} = \frac{\Delta I_К}{\Delta I_Б} = \beta,$$

$$R_{вх\,э} = \frac{U_{эб}}{I_б} = \frac{U_{эб}\cdot I_э}{I_э \cdot I_б} = R_{вх\,б}\frac{I_к + I_б}{I_б} = R_{вх\,б}(\beta + 1)$$

β - статический коэф-нт передачи тока базы, примем, что $\beta = B$, тогда

$$R_{вх\,э} = R_{вх\,б}(\beta+1) \approx \beta R_{вх\,б}$$

$$k_{U_э} = \frac{\Delta U_н}{\Delta U_{эб}} = \frac{\Delta I_к R_н}{\Delta I_б R_{вх\,э}} = \beta\frac{R_н}{\beta R_{вх\,б}} \approx \frac{R_н}{R_{вх\,б}},$$

где $k_{U_э} \gg 1$ т.к. $R_н \gg R_{вх\,б}$.

Для схемы ОК:

$$k_{I_к} = \frac{\Delta I_э}{\Delta I_б} = \frac{\Delta I_к + \Delta I_б}{\Delta I_б} = \beta + 1.$$

$$R_{вх\,к} = \frac{U_{кб}}{I_б} = \frac{U_{эб} + U_н}{I_б} = \frac{U_{эб}\,I_э}{I_б\,I_э} + \frac{U_н}{I_б} =$$

$$= \frac{U_{эб}}{I_э}\cdot\frac{I_э}{I_б} + \frac{I_э R_н}{I_б} = R_{вх\,б}(\beta+1) + R_н(\beta+1) =$$

$$= (R_н + R_{вх\,б})(\beta+1)$$

$$k_{U_к} = \frac{\Delta U_н}{\Delta U_{кб}} = \frac{\Delta U_н}{\Delta U_{эб} + \Delta U_н} = \frac{\Delta I_э R_н}{\Delta I_э R_{вх\,б} + \Delta I_э R_н} = \frac{R_н}{R_{вх\,б} + R_н}$$

Для схемы ОБ:

$$k_{I_б} = \frac{\Delta I_к}{\Delta I_э} = \alpha$$

$$R_{вх\,б} = \frac{U_{эб}}{I_э}$$

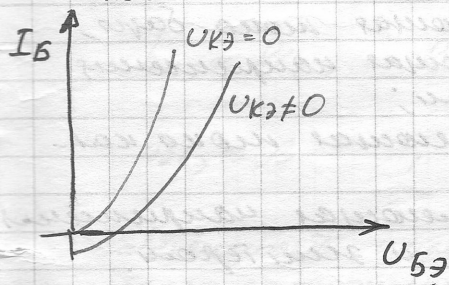
$$k_{U_б} = \frac{\Delta U_н}{\Delta U_{эб}} = \frac{\Delta I_к R_н}{\Delta I_э R_{вх\,б}} = \alpha\frac{R_н}{R_{вх\,б}}$$

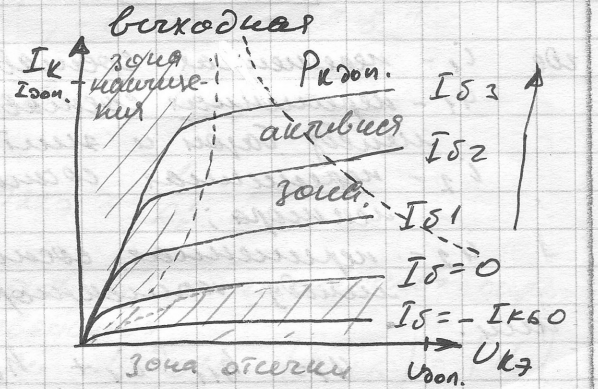
Основные показатели БТ для различных схем включения

Вид схемы	Токи		Напряж.		Основные параметры			Прим.
	$I_{вх}$	$I_{вых}$	$U_{вх}$	$U_{вых}$	k_I	k_U	$R_{вх}$	
ОБ	$I_Э$	$I_К$	$U_{Эб}$	$U_Н$	α	$\alpha \frac{R_Н}{R_{вх\,Б}}$	$\frac{U_{Эб}}{I_Э}$	$k_I < 1$ $k_U > 1$
ОЭ	$I_Б$	$I_К$	$U_{Эб}$	$U_Н$	β	$\beta \frac{R_Н}{R_{вх\,Б}}$	$\frac{U_{Эб}}{I_Э}(\beta+1)$	$k_I > 1$ $k_U > 1$
ОК	$I_Б$	$I_Э$	$U_{Кб}$	$U_Н$	$\beta+1$	$\frac{R_Н}{R_Н + R_{вх\,Б}}$	$R_Н(\beta+1)$	$k_I > 1$ $k_U < 1$

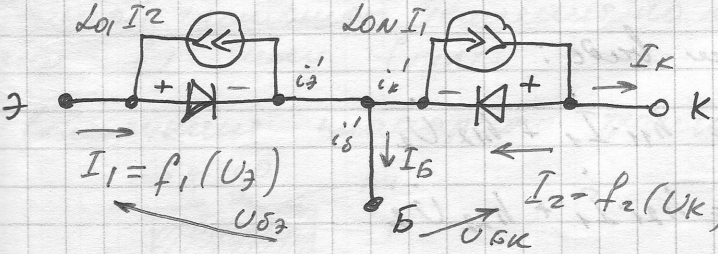
Транзистор как и 4-х полюсник характеризуется входной и выходной статическими ВАХ.

Для схемы ОЭ:





Для анализа цепей содержащих БТ применяются эквивалентные схемы: модель Эберса-Молл:



нелинейная модель транзистора ↑

Введение.

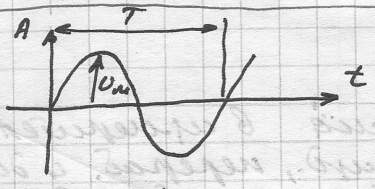
Электроника - область науки, техники и производства, охватывающая исследование и разработку электронных средств (ЭС) и принципов их использования.

Аналоговая электроника охватывает только те ЭС, которые предназначены для для преобразования и обработки информации, изменяющейся по закону непрерывной функции.

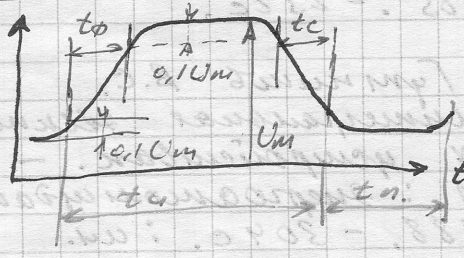
Цифровая электроника - охватывает ЭС для преобразования и обработки информации, изменяющейся по закону дискретной функции.

Исторические даты: УСТНО.

1904 г амер. Д. Флеминг изобрел электронную лампу - диод.
1907 г амер. Л. Форест изобрел триод.
1948 г амер. учеными изобретен первый полупроводниковый прибор - транзистор.
1960 г появляются первые ИС.
1970 г БИС
1980 г СБИС



непрерыв. Ф. я.



$U_м$ - амплитуда импульса или перепада
$t_ф$, t_c - длительность фронта и спада импульса
$t_и$ - длительность импульса
$t_п$ - длительность паузы
T - период

или:

$$i_э' = i_{эs}\left(e^{\frac{u_{бэ}}{\varphi_т}} - 1\right); \quad i_к' = i_{кs}\left(e^{\frac{u_{бк}}{\varphi_т}} - 1\right)$$

при $i_{кs} << I_{ко}$,

$$i_э = i_{эs}\cdot\left(e^{\frac{u_{бэ}}{\varphi_т}} - 1\right) - \alpha_{21}\, i_{кs}\left(e^{\frac{u_{бк}}{\varphi_т}} - 1\right)$$

$$i_к = \alpha\, i_{эs}\cdot\left(e^{\frac{u_{бэ}}{\varphi_т}} - 1\right) - i_{кs}\cdot\left(e^{\frac{u_{бэ}}{\varphi_т}} - 1\right)$$

Для определения переменных составляющих токов и напряжений в активном режиме работы транзистора пользуются h параметрами.

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ u_2 \end{bmatrix}$$

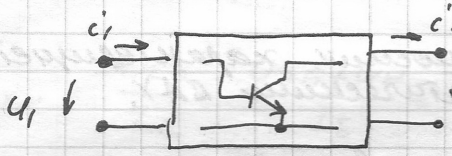


Схема ОЭ

где i_1 - переменная составляющая тока базы;
u_1 - переменная составляющая напряжения между базой и эмиттером;
i_2 - переменная составляющая тока коллектора;
u_2 - переменная составляющая напряжения между коллектором и эмиттером.

или:

$$u_1 = h_{11}\cdot i_1 + h_{12}\cdot u_2$$

$$i_2 = h_{21}\cdot i_1 + h_{22}\cdot u_2$$

в комплексном виде:

$$\dot{U}_1 = h_{11}\cdot\dot{I}_1 + h_{12}\cdot\dot{U}_2$$

$$\dot{I}_2 = h_{21}\cdot\dot{I}_1 + h_{22}\dot{U}_2$$

Коэффициенты:

h_{11} – входное сопротивление транзистора для переменного сигнала

$$h_{11} = \frac{u_1}{i_1}\Big|_{u_2=0} \quad \text{или} \quad h_{11} = \frac{\Delta U_1}{\Delta I_1}\Big|_{U_2=0}$$

h_{12} – коэффициент обратной связи по напряжению

$$h_{12} = \frac{u_1}{u_2}\Big|_{i_1=0} \quad \text{или} \quad h_{12} = \frac{\Delta U_1}{\Delta U_2}\Big|_{I_1=0}$$

h_{21} – коэффициент передачи тока

$$h_{21} = \frac{i_2}{i_1}\Big|_{u_2=0} \quad \text{или} \quad h_{21} = \frac{\Delta I_2}{\Delta I_1}\Big|_{U_2=0}$$

h_{22} – выходная проводимость

$$h_{22} = \frac{i_2}{u_2}\Big|_{i_1=0} \quad \text{или} \quad h_{22} = \frac{\Delta I_2}{\Delta U_2}\Big|_{I_1=0}$$

Параметры, соответствующие схеме с ОЭ обозначают буквой "э", с ОБ – "б"

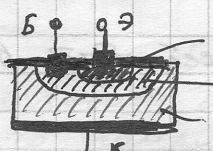
$$h_{11э} \approx R_{бх\,э} = R_{бх\,б}(\beta+1); \; h_{12э} \approx \frac{R_э}{2R_к'}$$

$$h_{21э} \approx \beta \quad ; \quad h_{22э} \approx \frac{1}{R_к'}$$

Зависимость параметров БТ от частоты определяет его частотные свойства.

Частота при которой модуль $|h_{21б}| = |\alpha|$ уменьшается в $\sqrt{2}$ раз относительно своего значения, измеренного на низкой частоте, называется предельной частотой усиления по току и обозначается f_α или f_{max}.

Конструкция планарного транзистора.



Классификация транзисторов.

1-я цифра.

частота / мощность	низкочаст.	средняя част.	высокочаст.
малой мощн.	1	2	3
средней мощн.	4	5	6
большой мощн.	7	8	9

маломощ. $P \leq 0,3$ Вт
средняя мощн. $P = 0,3 \div 1,5$ Вт
мощн. $P \geq 1,5$ Вт

низкочаст: $f \leq 0,3$ МГц
среднечаст: $f = 0,3 \div 3$ МГц
высокочаст: $f \geq 3 \div 30$ МГц
СВЧ : $f > 30$ МГц

1.4. Полевые транзисторы. [5 стр 100] [1 стр 52]

Полевой транзистор (ПТ) – полупроводниковый прибор, усилительные свойства которого, обусловлены потоком основных носителей заряда, протекающим через проводящий канал, и управляемым электрическим полем.

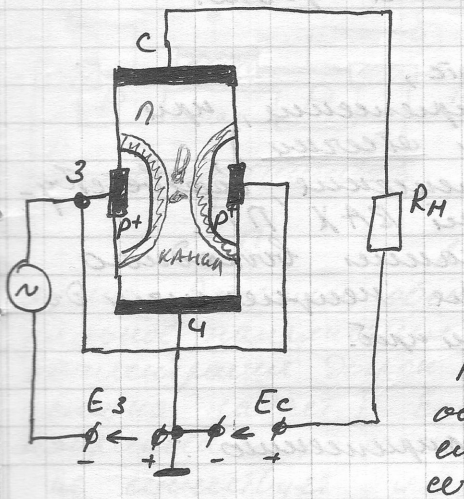
В ПТ управление происходит не за счет тока (как у БТ), а за счет напряжения.

Проводящий канал может быть приповерхностным (транзистор с изолированным затвором) и объемным (транзистор с управляющим p-n переходом). Первые имеют структуру – металл – диэлектрик – полупроводник (MDП) в которой роль диэлектрика играет оксид кремния. Поэтому их еще называют МОП (металл – оксид – полупроводник) транзисторами.

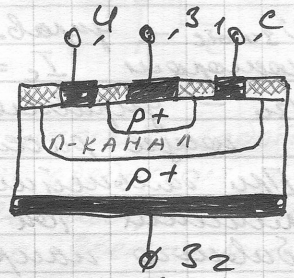
Металлический электрод, создающий эффект поля, называют затвором (З), два других – истоком (И) и стоком (С). (исток и сток в принципе обратимы.) Истоком служит электрод из которого, при соответствующей полярности напряжения между истоком и стоком, в канал поступают основные носители заряда, а стоком — тот электрод, через который эти носители уходят из канала.

Как и у БТ, ПТ могут быть включены по схеме ОИ, ОС, ОЗ.

Рассмотрим принцип работы ПТ с вынуж. ОЧ.

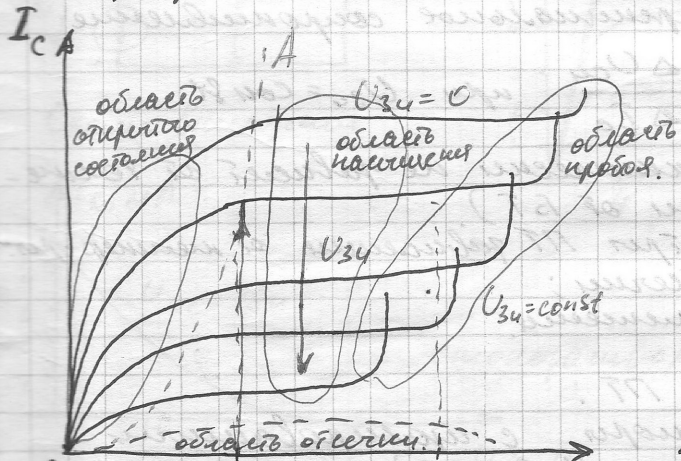


Структура ПТ

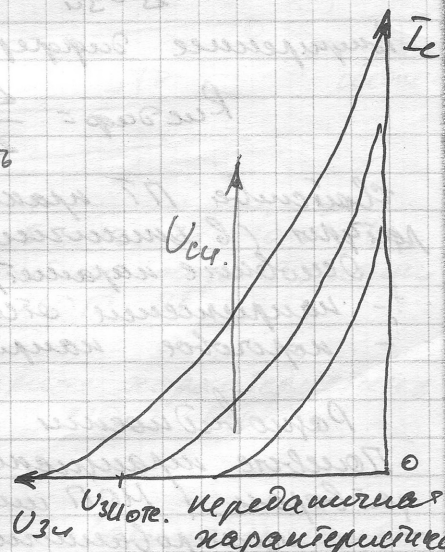


На p-n переход (затвор) подаётся обратное напряжение $U_{зи}$. При его увеличении, поперечное сечение канала ↓ сужается, при этом увеличивается сопротивление канала, и следовательно, снижается выходной ток. Поскольку напряжение прикладывается в обратном направлении ток крайне мал.

Для ПТ характерны статические ВАХ: выходные, передаточные.



выходная характеристика ПТ



передаточная характеристика.

Принцип выходного тока I_c ПТ при изменении $U_{си}$ происходит до определенного значения выходного напряжения, равного напряжению

насыщения - $U_{си\,нас}$ (пересечения кривой ОА и харак-ки ПТ). Это напряжение равно:

$$U_{си\,нас} = U_{зи} - U_{зи\,отс},$$

где $U_{зи\,отс}$ – управляющее напряжение, при котором $I_c = 0$ (режим отсечки)

$U_{зи}$ – управляющее напряжение, соответствующее рассматриваемой ВАХ ПТ.

При дальнейшем возрастании выходного напряжения ток I_c остается неизменным до пробивного напряжения $U_{си\,проб}$.

Основные параметры ПТ:

коэффициент усиления по напряжению:

$$k_u = \mu = \frac{\Delta U_{си}}{\Delta U_{зи}} \quad \text{при} \quad I_c = const$$

Крутизна (стокозатворной) характеристики:

$$S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зи}} \quad \text{при} \quad U_{си} = const.$$

Внутреннее дифференциальное сопротивление

$$R_{i\,диф} = \frac{\Delta U_{си}}{\Delta I_c} \quad \text{при} \quad U_{зи} = const$$

Свойства ПТ практически не зависят от температуры (в отличии от БТ).

Основные параметры ПТ зависящие от температуры:

- напряжение отсечки;
- пороговое напряжение.

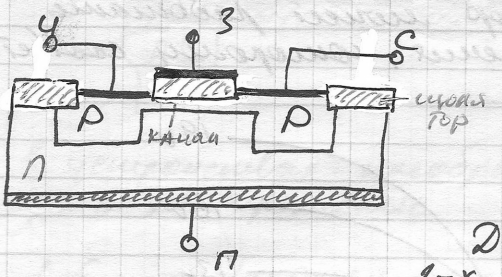
Разновидности ПТ:

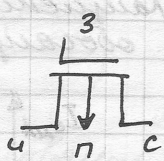
Полевые транзисторы с изолированным затвором (МОП или MOS FET):

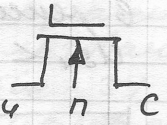
- с изолированным затвором и встроенным каналом;
- с изолированным затвором и индуцированным каналом.

Рассмотрим первые ПТ:

МДП транзистор со встроенным каналом







Данный ПТ может работать в 2-х режимах: обеднения и обогащения. Режиму обеднения соответствует положительное напряжение $U_{зи}$ (при его увеличении концентрация дырок в канале уменьшается и ток стока падает). Если напряжение $U_{зи}$ больше напряжения отсечки ($U_{зи} > U_{зи\,отс}$) то канал не существует и $I_c = 0$. Режиму обогащения соответствует отрицательное напряжение $U_{зи}$. Чем больше $U_{зи}$ тем больше ток стока.

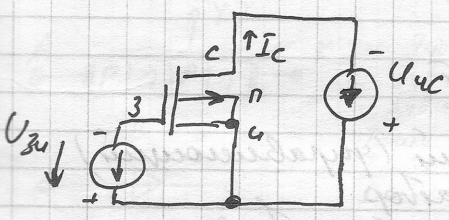
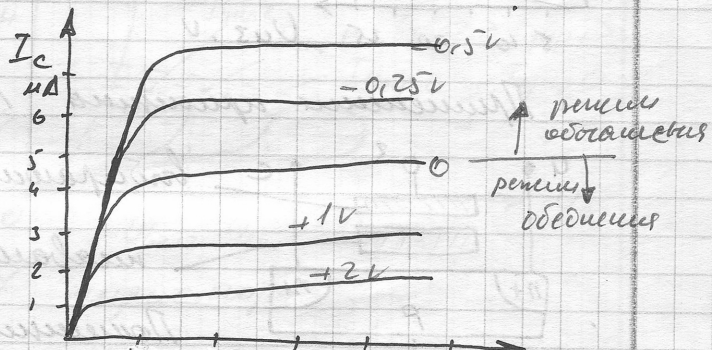
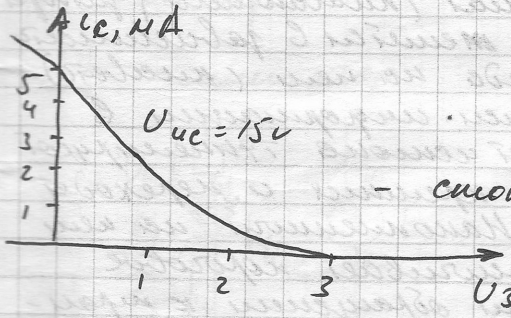


Схема включения.

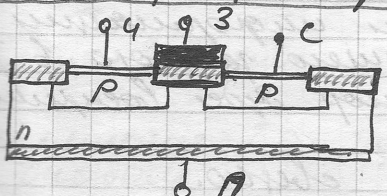


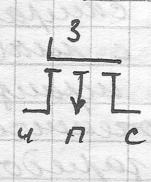
выходные характеристики МДП ПТ

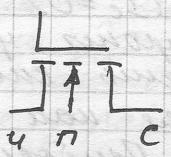


- стокозатворная характеристика МДП ПТ

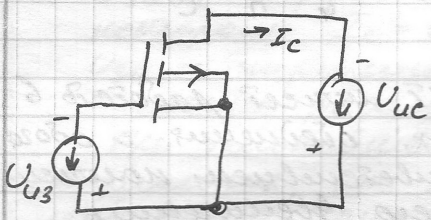
МДП транзистор с индуцированным каналом

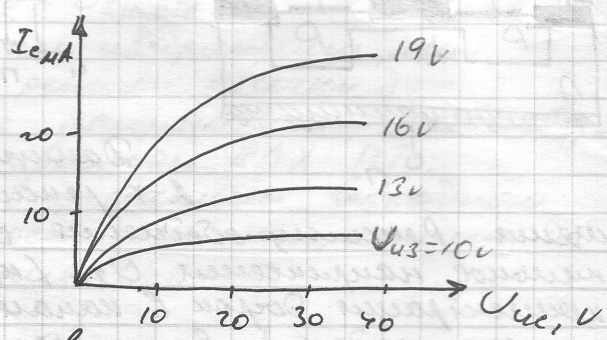




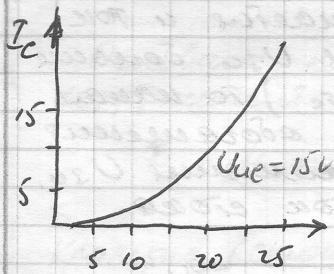


при нулевом напряжении $U_{зи}$ канал обеднён ($I_c = 0$). Такой транзистор может работать только в режиме обогащения, которому соответствует $U_{зи} < 0$.



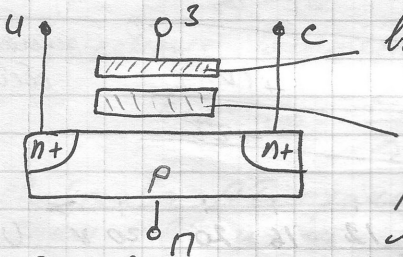


выходная характеристика



- стокозатворная характеристика ПТ.

Применение принципа ПТ.



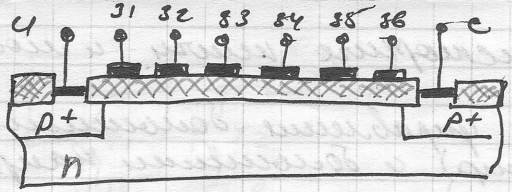
выбирающий (управляющий) затвор

плавающий затвор.

Ячейка flash

Потенциал (плавающего) затвора может меняться в зависимости от заряда на нем (плавает). При записи информации в ячейку памяти электроны от истока туннелируют через тонкий слой окисла кремния и переходят на плавающий затвор. Накопленный на нем отрицательный заряд увеличивает пороговое напряжение. Поэтому при обращении к транзистору он будет восприниматься как выключенный ($I_c = 0$). При стирании информации, электроны уходят с плавающего затвора в область стока и транзистор будет воспринимаься как включенный.

Приборы с зарядовой связью.

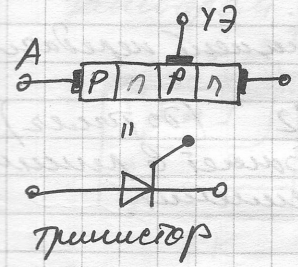


– схема прибора с ПЗС – предназначен для использования в качестве ЗУ ЭВМ и в устройствах преобразования сигналов оптических в электрические.

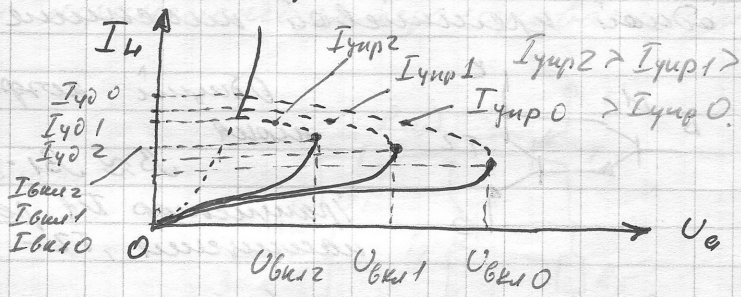
1.5. Тиристоры.

Тиристорами называют полупроводниковый прибор с двумя устойчивыми состояниями, имеющий три и более р-n переходов

Различают диодные тиристоры – динисторы; триодные – тринисторы. Кроме того данный прибор может работать на двух полуволнах — симистор.



тринистор



$I_{упр2} > I_{упр1} > I_{упр0}$

ВАХ тиристора.

– динистор

– симистор.

Напряжение управления – положительное относительно катода.

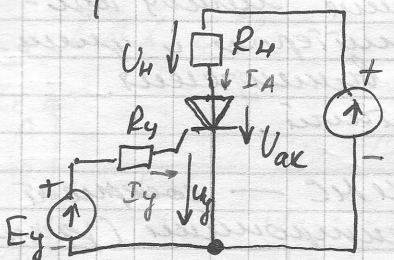


Схема включения

$$U_{ак} = E - I_А \cdot R_н$$

Для включения тиристора необходимо подать на управляющий электрод напряжение.

Для выключения – снять ток меньше чем удерживающий или поменять знак входного напряжения. Т.о. тиристор имеет управляемый диодом.

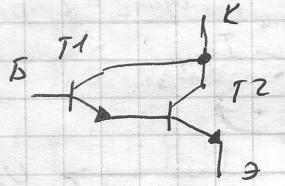
1.6. Силовые транзисторные ключи и модули.

Предназначены для управления большими токами (≤ сотни ампер) с большими напряжениями (≤ тысячи вольт)

Несколько силовых транзисторов (при необходимости и диодов и пр. элементов) конструктивно выполненные в одном корпусе принято называть силовым модулем.

Основная схема включения силового транзистора – ОЭ.

Рассмотрим транзистор Дарлингтона (составной транзистор) выполненный на одной кремниевой пластине.

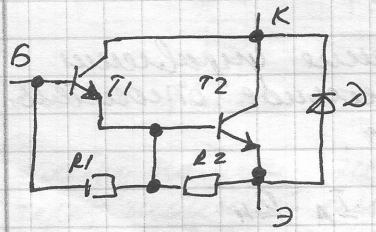


Общий коэффициент передачи тока

$B \approx B1 \cdot B2$ (до тысяч)

Транзистор Т1 работает в режиме насыщения, Т2 – усиления.

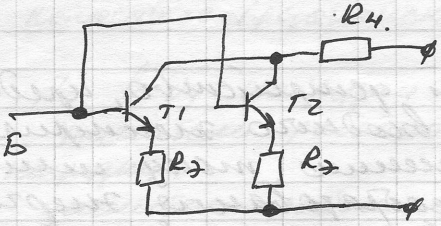
Рассмотрим силовую ИМС:



Резисторы R_1 и R_2 увеличивают максимально допустимое напряжение между коллектором и эмиттером и уменьшают время выключения.
Диод Д – защитный.

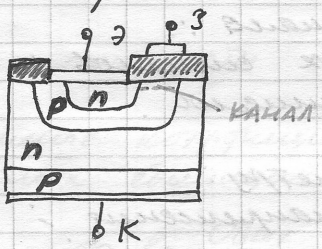
Интеллектуальные силовые ИМС — содержат элементы информационной электроники (защита, диагностика, управление и т.п.).

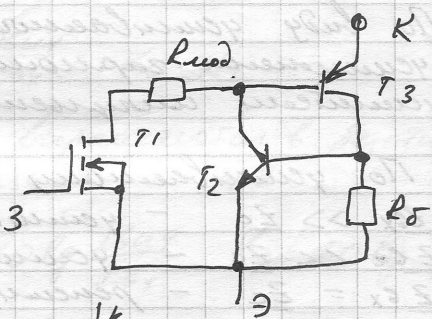
Параллельное включение транзисторов приходится использовать для увеличения тока нагрузки.



Рассмотрим IGBT транзистор (Insulated Gate Bipolar transistor) – гибридный полупроводниковый прибор в котором совмещены два способа управления электрическим током, один из которых характерен для полевых транзисторов (управление электрическим полем), а второй – для биполярных (управление движением носителей электричества).

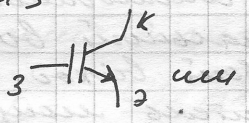
Такие транзисторы носят название: БТИЗ – биполярный транзистор с изолированным затвором.



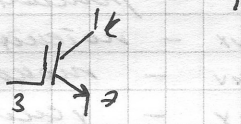


Структура БТИЗ

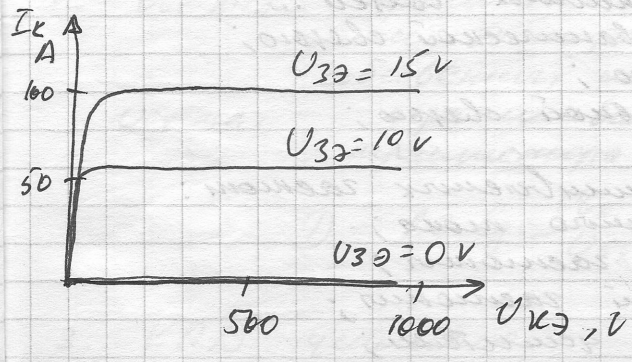
УГО



или



ВАХ БТИЗ



Такой транзистор устойчив к замыканию в нагрузке, что говорит о повышенной надежной устойчивости.

$f = \frac{1}{T}$ - частота импульсов

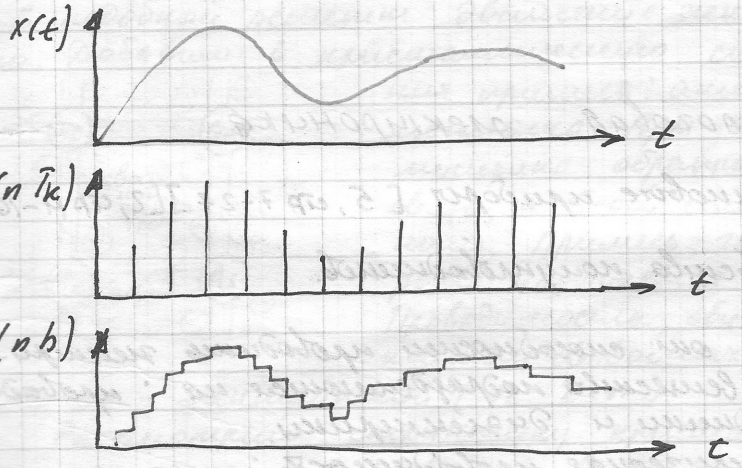
$T = t_и + t_п$,

$K_з = \frac{t_и}{T}$ - коэф-т заполнения импульсов.

$q = \frac{T}{t_и}$ - скважность импульсов.

При $t_и = t_п$ - меандр.

Импульсные ЭС реализуют квантование исходного сигнала $x(t)$ во времени и преобразуют его в импульсы (часто импульсной частоты).



входной сигнал

квантование по времени

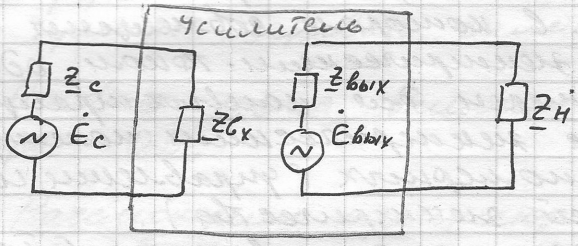
квантование по уровню.

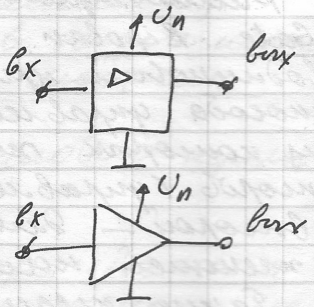
Процесс преобразования исходной аналоговой информации в последовательность импульсов носит название импульсной модуляции.

На практике широко распространены:
- амплитудно-импульсная модуляция (АИМ);
- широтно-импульсная модуляция (ШИМ);
- фазоимпульсная модуляция

2. Усилители.

Усилителем называют устройство, предназначенное для усиления входного электрического сигнала по напряжению, току или мощности за счет преобразования энергии источника питания в энергию выходного сигнала.





2.1. Классификация усилителей:

1. По виду усиливаемого сигнала:
   - усилители гармонических сигналов;
   - усилители импульсных сигналов.

2. По усиливаемому параметру:
   - $\underline{Z}_{вх} >> \underline{Z}_c$ – усилитель напряжения;
   - $\underline{Z}_{вх} << \underline{Z}_c$ – усилитель тока;
   - $\underline{Z}_{вх} = \underline{Z}_c$ – режим согласованного входа;
   - $\underline{Z}_н >> \underline{Z}_{вых}$ – потенциальный выход;
   - $\underline{Z}_н << \underline{Z}_{вых}$ – токовый выход;
   - $\underline{Z}_н = \underline{Z}_{вых}$ – усилитель мощности.

3. По виду межкаскадных связей:
   - усилитель с гальванической связью;
   - –"– с RC связью;
   - –"– с индуктивной связью;

4. По диапазону усиливаемых частот:
   - усилители постоянного тока;
   - усилители низкой частоты;
   - усилители высокой частоты;
   - широкополосные усилители;

- полосовые (резонансные, избирательные) усилители.

5. По виду нагрузки:
- усилители работающие на индуктивную нагрузку;
- усилители работающие на активно-индуктивную нагрузку;
- усилители работающие на активно-емкостную нагрузку.

2.2. Характеристики усилителей

1. Коэффициент усиления:
- по напряжению $K_U = \frac{U_{вых}}{U_{вх}}$;
- по току $K_I = \frac{I_{вых}}{I_{вх}}$;
- по мощности $K_P = \frac{P_{вых}}{P_{вх}} = K_U \cdot K_I$

Данные коэффициенты выражаются в безразмерных единицах: децибелах dB:

$$K_U = 20 \lg \frac{U_{вых}}{U_{вх}} \quad K_I = 20 \lg \frac{I_{вых}}{I_{вх}} \quad K_P = 10 \lg \frac{P_{вых}}{P_{вх}}$$

2. Динамический диапазон:

$$D = \frac{U_{вх\,max}}{U_{вх\,min}},$$

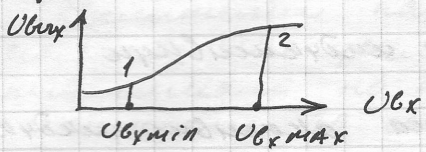
где $U_{вх\,min}$ – ограничивается сигналом, который может быть расположен на уровне собственных шумов усилителя

$U_{вх\,max}$ – ограничивается напряжением транзистора.

$$D = 20 \lg \frac{U_{вх\,max}}{U_{вх\,min}}$$

3. КПД усилителя: $\eta = \frac{P_н}{P_{общ}}$

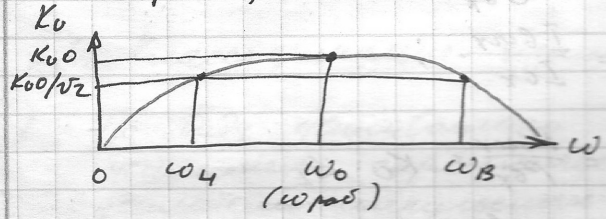
4. Амплитудная характеристика (АХ): — зависимость выходного сигнала от входного



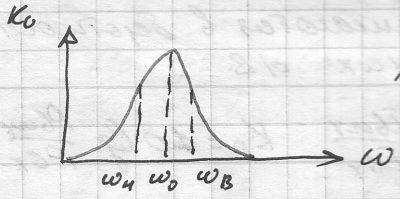
5. Амплитудо-частотная характеристика (АЧХ) — зависимость коэффициента передачи по напряжению усилителя от частоты

$$\dot{K}_U = K_U e^{j\varphi_U} \qquad \dot{K}_U(\omega) = K_U(\omega) e^{j\varphi_U(\omega)}$$

где $K_U(\omega)$ — АЧХ усилителя;
$\varphi_U(\omega)$ — ФЧХ усилителя.

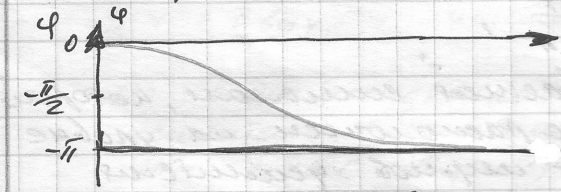


$$\omega_0 = \sqrt{\omega_н \omega_в}$$



АЧХ избирательного усилителя.

6. Фазочастотная характеристика (ФЧХ)



Искажения сигнала с искажением частоты и нелинейности ВАХ сведем к параметрам:

γ — коэффициент нелинейных искажений;
$M(\omega)$ — коэффициент частотных искажений;

Коэффициент частотных искажений

$M(\omega)$ показывает влияние частоты входного сигнала на изменение коэффициента передачи усилителя по напряжению:

$$M(\omega) = \frac{K_U(\omega)}{K_{U0}},$$

где K_{U_0} – коэффициент передачи усилителя в области средних звуковых частот;
$K_U(\omega)$ – коэффициент передачи в других областях.

При $0 < \omega < \omega_н$ (т.е. в области низких частот)

$$M_н(\omega) = \frac{K_{Uн}(\omega)}{K_{U0}}$$

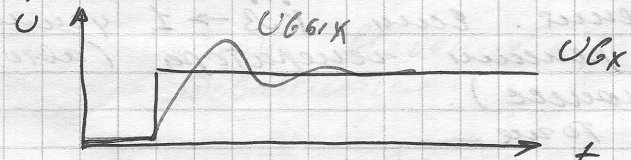
При $\omega > \omega_н$ $M_в(\omega) = \frac{K_{Uв}(\omega)}{K_{U0}}$ (в области высоких частот).

Влияние нелинейности входной и выходной ВАХ оценивают коэффициентом нелинейных искажений. Он зависит от положения рабочей точки, от типа транзистора, способа его включения и от величины входного сигнала

γ - показывает насколько искажена синусоидальная форма сигнала:

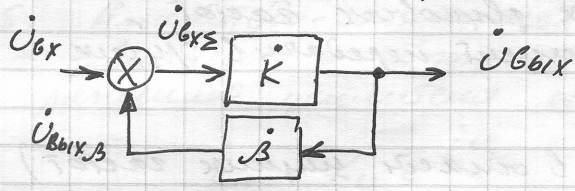
$$\gamma = \frac{\sqrt{U_{m2}^2 + U_{m3}^2 + \dots}}{U_{m1}^2} \cdot 100\%.$$

7. Переходная характеристика: влияние скачка входного сигнала на процессы, происходящие на выходе усилителя.



2.3. Обратная связь в усилителях.

Обратной связью называется часть выходного сигнала, которая подается на вход усилителя. Может быть:
- положительная обратная связь ПОС;
- отрицательная обратная связь ООС.



$$\dot{U}_{вых} = \dot{U}_{вх\Sigma} \cdot \dot{K}$$

$$\dot{U}_{вх_\Sigma} = \dot{U}_{вх} \pm \dot{U}_{вых} \cdot \dot{\beta}$$

"+" – ПОС;
"–" – ООС.

$$\dot{K}_{пос} = \frac{\dot{U}_{вых}}{\dot{U}_{вх}} = \frac{\dot{K}(\dot{U}_{вх} + \dot{U}_{вых} \cdot \dot{\beta})}{\dot{U}_{вх}} = \dot{K} + \frac{\dot{U}_{вых}}{\dot{U}_{вх}} \cdot \dot{\beta} \cdot \dot{K} =$$

$$= \dot{K} + \dot{K}_{пос} \dot{\beta} \dot{K}$$

$$\dot{K}_{пос} = \frac{\dot{K}}{1 - \dot{\beta}\dot{K}}$$

$$\dot{K}_{ООС} = \frac{\dot{K}}{1 + \dot{\beta}\dot{K}}$$

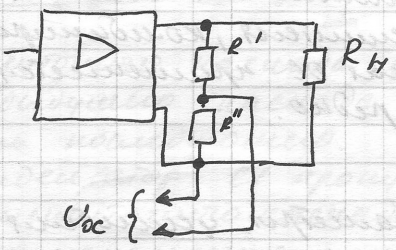
Положительная обратная связь увеличивает коэффициент усиления. Если $\dot{K}\dot{\beta} \to 1$ усилитель переходит в режим генератора (автоколебательный процесс).
Если $K\beta > 1$ – то же

Отрицательная обратная связь ослабляет коэффициент усиления. Если $\dot{K}\beta >> 1$, то

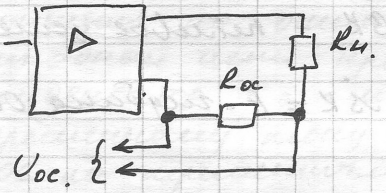
"1" в знаменателе пренебрегают и тогда коэффициент усиления системы не зависит от коэффициента усиления усилителя и определяется только параметрами цепи обратной связи.

2.4. Способы "снятия" обратной связи

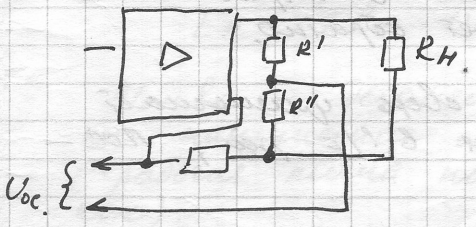
1. По напряжению



2. По току

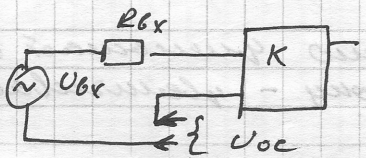


3. Комбинированная

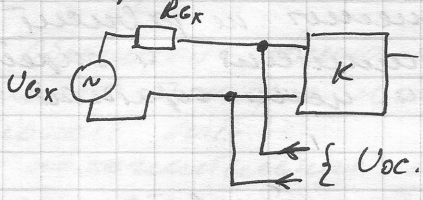


2.5. Способы введения обратной связи

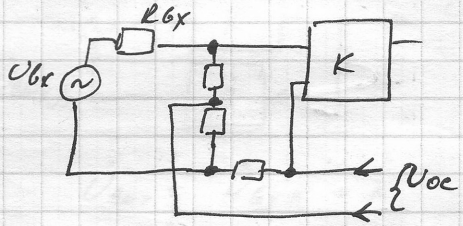
1. Последовательная



2 Параллельная



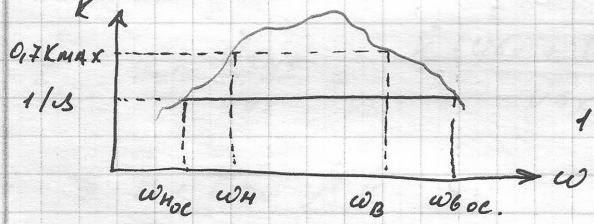
3. Комбинированная



Из-за противоречивого влияния на свойства усилителя, комбинированная ОС применяется редко.

2.6. Влияние ОС на параметры усилителя

1. Полоса пропускания



$\dot{\beta}K$ - петлевое усиление.

$1+\dot{\beta}K = F$ - глубина ООС

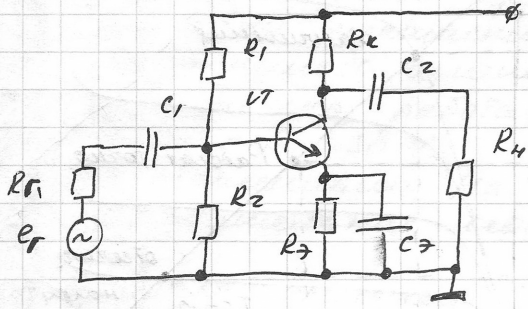
Обратная отрицательная связь расширяет полосу пропускания усилителя и выравнивает АЧХ. ПОС функционирует обратно.

2. обратная отрицательная связь уменьшает нестабильность усилителя в $1/F$ раз, ПОС - увеличивает.

3. Последовательная ООС увеличивает входное сопротивление усилителя, параллельная - уменьшает.

4. ООС: по напряжению уменьшает выходное напряжение, по току - увеличивает.

2.7. Усилительный каскад с общим эмиттером.



$R_н = R_{вх\,i+1}$

$R_г = R_{вых\,i-1}$

В многокаскадных усилителях с реостатно-емкостными связями источником сигнала для i-го промежуточного каскада является выходная цепь предыдущего каскада, а нагрузкой — входная цепь последующего.

Конденсатор C_1 пропускает во входную цепь промежуточного каскада переменную составляющую напряжения источника сигнала и не пропускает постоянную составляющую.

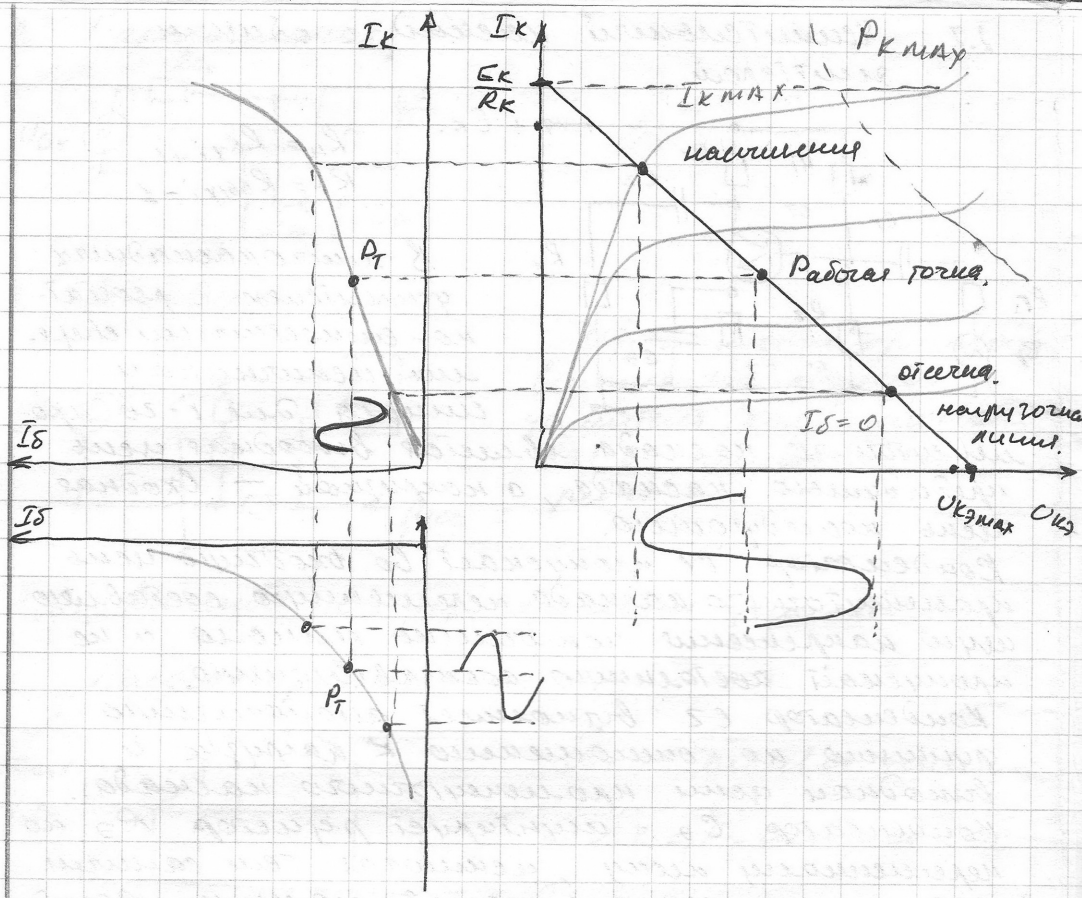
Конденсатор $C_г$ выполняет аналогичную функцию по отношению к нагрузке и выходной цепи промежуточного каскада.

Конденсатор $C_э$ - шунтирует резистор $R_э$ по переменному току, исключая тем самым ООС по переменной составляющей. Отсутствие конденсатора $C_э$ приводит от к уменьшению усиления каскада.

$E_к = i_к R_к + U_{кэ}$ - уравнение нагрузки.

R1 и R2 - делитель напряжения для создания напряжения смещения транзистора (рабочая точка на выходных характеристиках).

$R_к$ - сопротивление в коллекторной цепи является нагрузкой



Принцип действия: входное напряжение изменяет напряжение Uбэ транзистора, которое в соответствии с входной характеристикой изменяет ток базы. Изменение тока базы влечет изменение тока коллектора. Падение напряжение на нагрузке транзистора — Rк является выходным сигналом.

Каскад с ОЭ является инвертором входного напряжения т.е. меняет фазу выходного сигнала относительно входного на π.

За счет использования энергии источника питания, каскад усиливает ток, напряжение и мощность.

2.8. Понятия о классах усилителей.

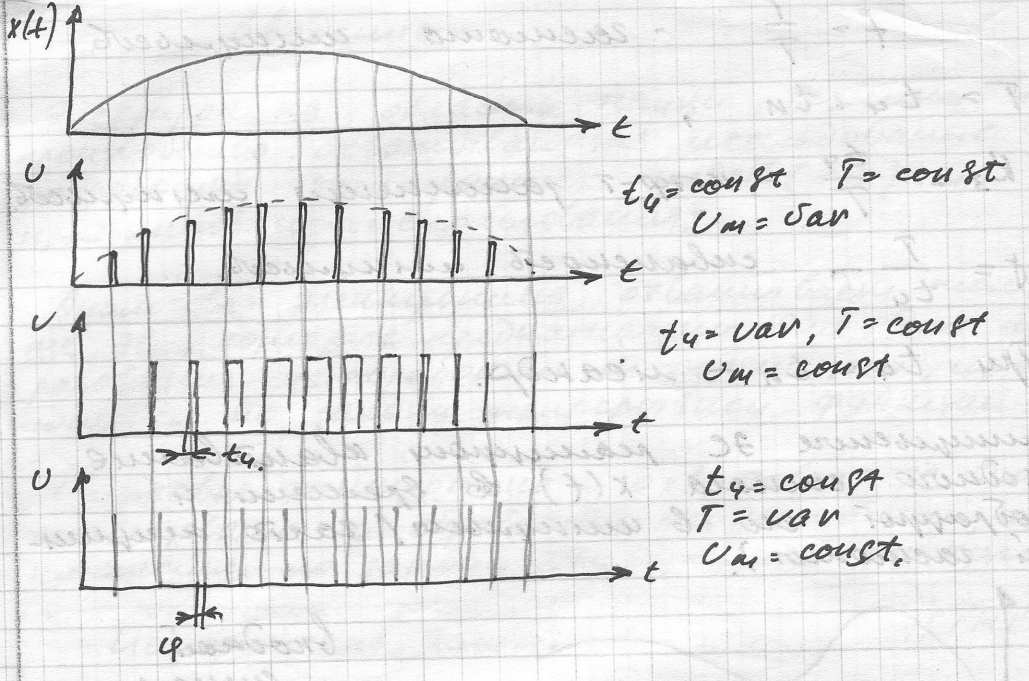
Класс усиления А. Режим работы транзисторного каскада, при котором, ток в выходной цепи транзистора протекает в течение всего периода изменения входного сигнала.
Транзистор работает в линейной области.
КПД = 5... 30 %, характеризуется малыми искажениями. На транзисторе рассеивается значительная мощность. (есть смещение)

Класс усиления В. Режим работы транзисторного каскада, при котором ток в выходной цепи транзистора протекает только в течение половины периода изменения напряжения входного сигнала.
(нет смещения, Нижний участок характеристики имеет нарушен). КПД ≤ 70% и более, снижена рассеиваемой мощности.

Класс усиления АВ. Режим работы транзисторного каскада при котором ток в выходной цепи транзистора протекает больше половины периода изменения напряжения входного сигнала.
высокий КПД, малые искажения выходного сигнала.

Класс усиления С. Режим работы транзисторного каскада, при котором ток в выходной цепи транзистора протекает на интервале меньшем половины периода изменения напряжения входного сигнала.
В этом режиме транзистор находится больше половины периода в режиме отсечки.

Класс усиления D. Режим работы транзисторного каскада, при котором в установившемся режиме усилительный элемент (транзистор) может находиться только в состоянии включено (режим насыщения) или выключено (режим отсечки) — ключевой режим.



Аналоговая электроника

1. Полупроводниковые приборы [5, стр 7-27][2, стр 4-

1.1. Общие свойства полупроводников.

В зависимости от способности проводить электрический ток, все вещества подразделяются на: проводники, полупроводники и диэлектрики.

Удельная электрическая проводимость:

проводники $\sigma > 10^4$ См/см;

диэлектрики $\sigma < 10^{-10}$ См/см;

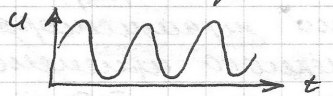
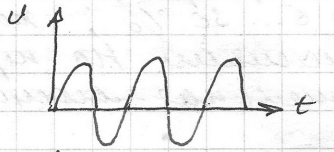
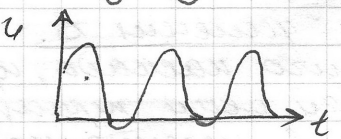
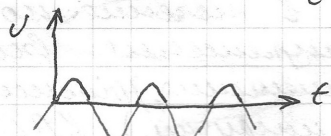
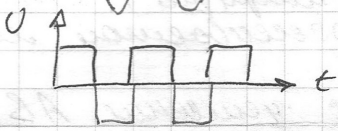
полупроводники $\sigma \approx 10^{-10} \div 10^4$ См/см.

Полупроводники характеризуются сл. признаками:

- сильная зависимость проводимости от температуры (возрастает, а у проводников падает);
- зависимостью проводимости от различных внешних воздействий (освещения, ионизирующего излучения и т.п.) (проводники практически нечувствительны)
- высокой восприимчивостью к примесям.

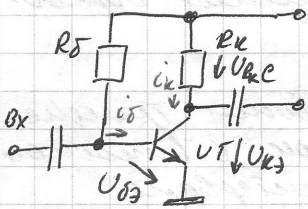
К полупроводниковым материалам относятся:

КПД до 90%

Класс	Смещение	осциллограмма
A	>0	
B	=0	
AB	>0	
C	<0	
D	=0	

2.9. Методы подачи смещения

Схема с фиксированным током базы



По второму закону Кирхгофа

$i_к \cdot R_к + U_{кэ} - E_к = 0$, откуда ток коллектора: $i_к = -\frac{1}{R_к} \cdot U_{кэ} + \frac{1}{R_к} \cdot E_к$

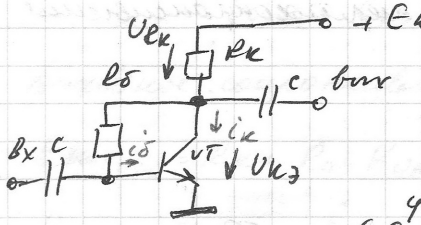
$i_б \cdot R_б + U_{бэ} - E_к = 0$, откуда ток базы

$$i_б = -\frac{1}{R_б} U_{бэ} + \frac{1}{R_б} \cdot E_к$$

В заданной схеме ток $i_б$ задается величинами $E_к$ и $R_б$.

Недостаток: сильная зависимость тока базы от температуры (и соответственно тока коллектора)

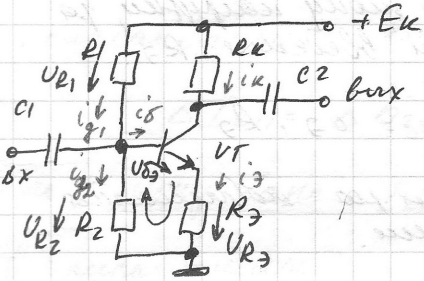
Схема с коллекторной стабилизацией



В схеме имеет место отрицательная обратная связь по напряжению.

При увеличении температуры увеличивается ток $i_к$, это приведет к увеличению $U_{Rк}$ и уменьшению $U_{кэ}$ ($E_к = U_{Rк} + U_{кэ}$), следовательно уменьшится ток базы и компенсирует возрастание коллекторного тока: $i_б \approx \frac{U_{кэ}}{R_б}$

Схема с эмиттерной стабилизацией.



Ток делителя напряжения

$I_д = (1 \ldots 3)\, I_{б0}$ оконч.

$(5 \ldots 10)\, I_{б0}$ предвар.

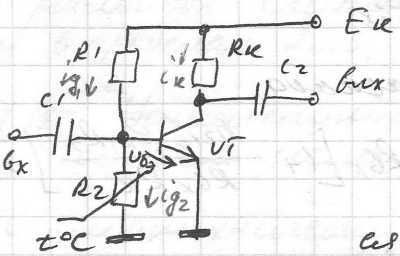
$$R_1 = \frac{E_к - U_{бэ0}}{I_д + I_{б0}} \qquad R_2 = \frac{U_{бэ0}}{I_д}.$$

При увеличении температуры увеличивается ток $i_к$ (и $i_э$) и создает падение U на $R_э$. По II-му закону Кирхгофа:

$$U_{бэ} + U_{Rэ} - U_{R2} = 0$$

$U_{Rэ}$ и U_{R2} направлены встречно, поэтому при увеличении $U_{Rэ}$ происходит уменьшение $U_{бэ}$, снижая при этом ток $i_к$.

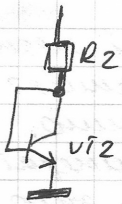
Схема с термокомпенсацией



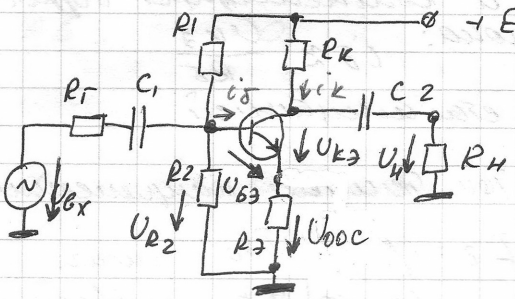
R2 – терморезистор.

При увеличении температуры, сопротивление R2 падает и напряжение $U_{бэ}$ снижается, уменьшая ток $i_к$

вместо R2 ставится транзистор, который выполняет роль переменного сопротивления.



2.10. Каскад с общим эмиттером, общая коллектора [1, 197–203]



Каскад охвачен последовательной ООС по току нагрузки, за счет введения $R_э$.

$$U_{ooc} = i_э \cdot R_э$$

Усиление каскада снижается но повышается входное и выходное сопротивление.

коэффициент передачи каскада

$$K_{Uк\,ooc} = \frac{K_{Uк}}{1 + K_{Uк}\, b_{ooc})}$$

$$b_{ooc} = \Delta U_{oc} / \Delta U_{вых} = \frac{R_э \Delta I_э}{R_к \Delta I_к},$$

полагая, что в следствие большого $h_{21э}$, $I_э \approx I_к$

$$b_{ooc} = \frac{R_э}{R_к},$$ подставим в исходное получим:

$$K_{Uк\,ooc} = \frac{h_{21э} \cdot R_к / R_{бх}}{1 + R_э h_{21э} \frac{R_к}{R_к R_{бх}}} = \frac{h_{21э} R_к}{R_{бх} + R_э h_{21э}}$$

входное сопротивление каскада

$$R_{бх\,ooc} = R_{бх}(1 + K_{Uк} b_{oc}) = R_{бх}\left[1 + \frac{h_{21э} R_к R_э}{R_{бх} R_к}\right] =$$

$$= R_{бх} + R_э h_{21э}$$

откуда:

$$K_{U\,ООС} = K_{U\,К\,ООС} \cdot K_{дел\,ООС} = \frac{h_{21Э} R_К}{R_{вх} + R_Э h_{21Э} + R_б}$$

Выходное сопротивление:

$$R_{вых\,ООС} = R_К + R_Э \cdot K_{UК} = R_К + R_Э \cdot \frac{h_{21Э} R_К}{R_{вх}} = R_К\left(1 + \frac{R_Э h_{21Э}}{R_{вх}}\right)$$

Рассмотрим влияние введенной ООС на стабильность тока покоя каскада. Основной фактор дестабилизации — изменение температуры.

Ток покоя: $I_{Кп} = h_{21Э} \cdot I_{Бп}$, в приращениях:

$$I_{Кп} + \Delta I_{Кп} = (h_{21Э} + \Delta h_{21Э})(I_{Бп} + \Delta I_{Бп})$$

полагая, что $\Delta h_{21Э} \cdot \Delta I_{Бп} \approx 0$, получим:

$$\Delta I_{Кп} = \Delta h_{21Э} I_{Бп} + h_{21Э} \cdot \Delta I_{Бп}$$, переходя к току базы: $I_{Бп} = \dfrac{E_{Бэкв} - U_{БЭп} - R_Э(I_{Кп} + I_{Бп})}{R_б}$

в приращениях:

$$\Delta I_{Бп} = \frac{U_{БЭп} + (\Delta I_{Кп} + \Delta I_{Бп}) R_Э}{R_б}$$

или:

$$\Delta I_{Кп} = \left[\frac{h_{21}(R_б + R_Э)}{R_б + (1 + h_{21Э}) R_Э}\right]\left(\frac{\Delta h_{21Э} I_{Бп}}{h_{21Э}} - \frac{\Delta U_{БЭп}}{R_б + R_Э}\right)$$

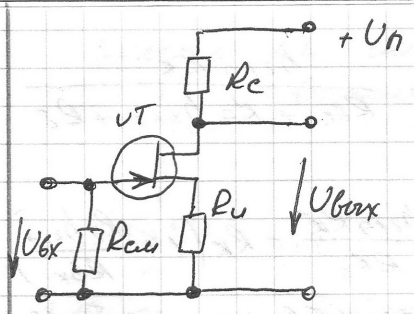
величину в [скобках] принято называть коэффициентом нестабильности S_i

$$S_i = \frac{h_{21Э}(R_б + R_Э)}{R_б + (1 + h_{21Э}) R_Э}$$

В реальных схемах этот коэффициент лежит в пределах 2...5.

2.11. Усилительный каскад по схеме с общим истоком.

Схемотехнические решения аналогичны и похожи на каскады с биполярными транз-ми.



Наиболее часто эта схема используется с режимом класса А. Основные черты:
- большое входное сопротивление;
- малый коэффициент шума;
- большая термостабильность.

Коэффициент усиления каскада:

$$K_{UK} = \frac{U_{вых}}{U_3} = \frac{r_c \cdot R_c S U_3}{(r_c + R_c) U_3} = \frac{r_c R_c S}{r_c + R_c},$$

где r_c - дифференциальное выходное сопротивление транзистора:

$$r_c = \frac{dU_c}{dI_c}$$

Обычно в каскадах выполняется условие $R_c \ll r_c$, тогда

$$K_{UK} = S R_c.$$

Входное сопротивление:

$$R_{вх} = \frac{R_{см} R_3}{R_{вх} + R_3} \approx R_{см}$$

выходное:

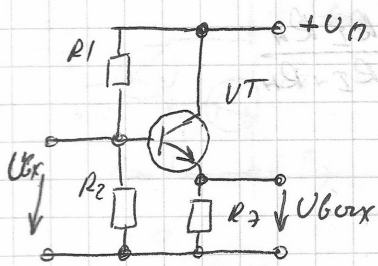
$$R_{вых} = \frac{R_c r_c}{R_c + r_c} \approx R_c$$

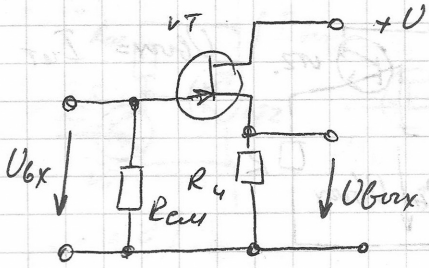
Коэффициент усиления с ООС:

$$K_{Uooc} = \frac{K_{U_0}}{(1 + K_{U_0} b_{oc})} = \frac{S R_c}{1 + S R_c \frac{R_н}{R_c}} = \frac{S R_c}{1 + S R_н}$$

2.12. Эмиттерный и истоковый повторители.

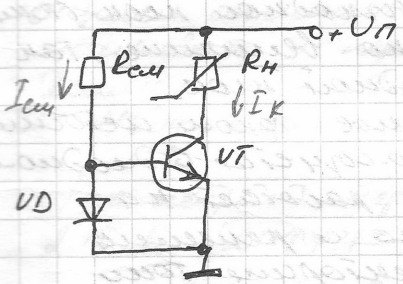
Эмиттерный и истоковый повторители каскады, охваченные 100% последовательной ООС

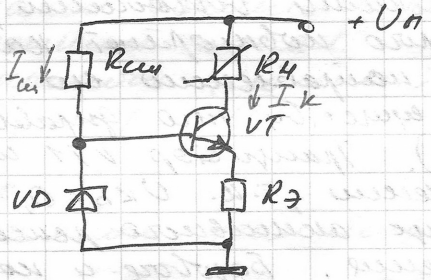




Каскад на БТ не инвертирует входной сигнал (в отличии от схем с ОЭ), поэтому входной и выходной сигналы будут в одной фазе. Каскад наиболее удобен для согласования высокоомных источников сигнала с низкоомной нагрузкой. Коэффициент усиления по напряжению близок к 1, но току до 10.

2.13. Источники постоянного тока и напряжения.

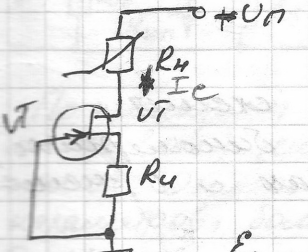




Ток коллектора:

$$I_к = \frac{h_{21э}\,(U_п - U_{до})}{2\left(R_{см} + \frac{R_э}{2}\right)}$$

Схемы обладают повышенной температурной стабильностью.

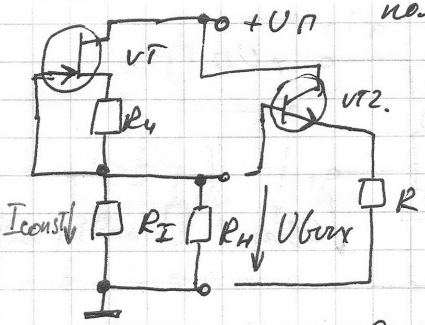


При закорачивании $R_н$ — ток максимальный.

$$R_н = \frac{U_{зн}}{I_{с\,зад.}}$$

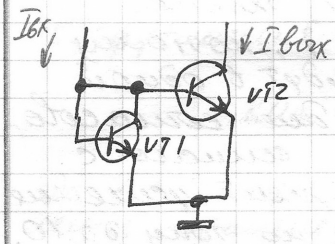
Если источник тока нагрузить на активное сопротивление, то

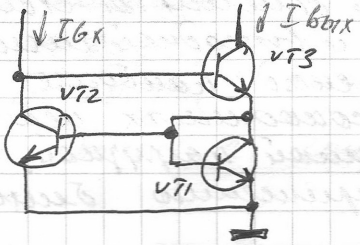
получится источник напряжения.



$$U_{вых} = I_{ИТ} \frac{R_I R_Н}{R_I + R_Н}$$

Схема "токового зеркала"





"Токовым зеркалом" называют электронное устройство с одним входом и одним или несколькими выходами, выходной ток (токи) которого повторяют как по величине, так и по направлению его входной ток.
(По существу это управляемое током источник тока). Транзистор VT1 используется в диодном включении, т.к. $U_{КБ} = 0$, он работает на границе активного режима и режима усиления. Базовые и коллекторные токи связаны соотношением:

$$I_{К\,VT1} = I_{Б\,VT1} \cdot h_{21Э},$$

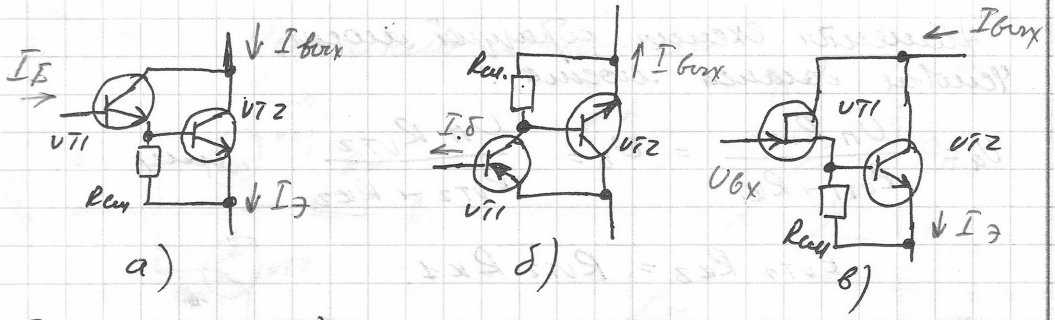
т.к. параметры транзисторов идентичны, то

$$U_{БЭ\,VT1} = U_{БЭ\,VT2} \quad и \quad I_{Б\,VT1} = I_{Б\,VT2},$$

откуда:

$$I_{К\,VT1} = I_{К\,VT2}$$

2.14. Составные транзисторные схемы могут быть построены как на биполярных, так и на полевых транзисторах и в смешанном варианте.



Для схемы а):

$$I_{вых} \approx I_{б1} h_{21э1} h_{21э2}$$

Составные транзисторы применяются для усиления мощности (тока) в интегральных схемах.

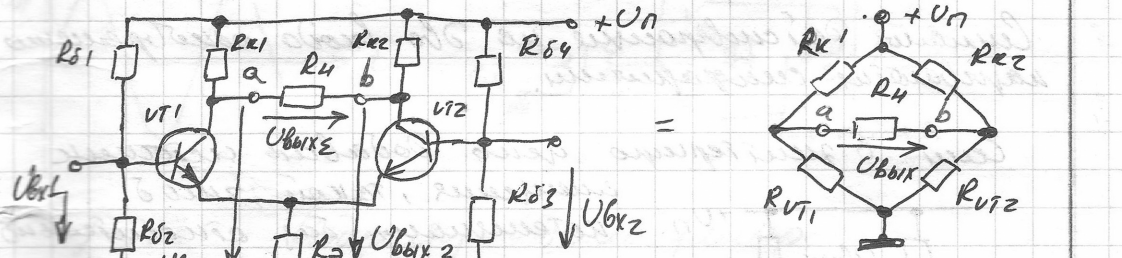
2.15. Усилители постоянного тока (УПТ)

УПТ – называют усилитель, если он может усиливать постоянные и медленно изменяющиеся сигналы. Такой усилитель может усиливать и переменный сигнал.

Делятся на: – УПТ прямого усиления;
– Модулятор – демодулятор УПТ.

Рассмотрим первые.

2.15.1. Дифференциальный усилитель.



По принципу построения это балансные (мостовой) усилительный каскад параллельного типа. Они обладают высокой стабильностью параметров, большим коэффициентом усиления дифференциальных сигналов и высокой степенью подавления синфазных помех.

Элементы схемы образуют мост.
Условие баланса моста:

$$U_a = \frac{U_п R_{VT1}}{R_{VT1} + R_{K1}} = U_b = \frac{U_п R_{VT2}}{R_{VT2} + R_{K2}}, \text{ или}$$

$$R_{VT1} R_{K2} = R_{VT2} R_{K1}.$$

Нарушение этого условия приводит к разбалансировке моста и появлению выходного напряжения.

$$U_{вых} = U_{вых1} - U_{вых2} = -K_1 U_{вх1} - (-K_2 U_{вх2})$$

где K_1 и K_2 – коэффициенты усиления первого и второго каскадов.

$$U_{вых} = -U_{вх} \frac{(K_1 + K_2)}{2} = -U_{вх} K_{ду}$$

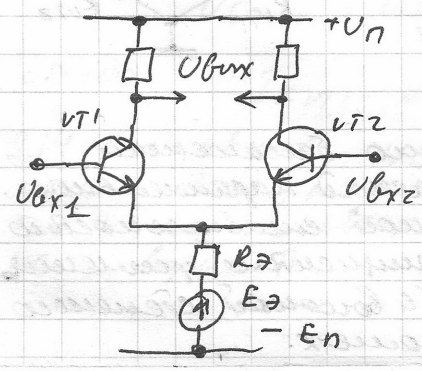
$K_{ду} = \frac{K_1 + K_2}{2}$ – коэф-т усиления диф-го усилит-ля.

Коэффициент усиления по напряжению

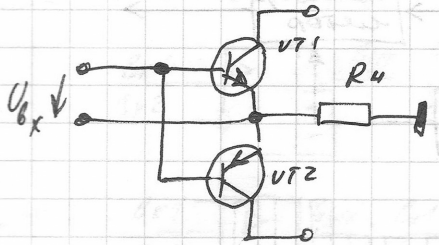
$$K_U = \frac{U_{вых}}{2} \Big/ \frac{U_{вх}}{2} = \frac{R_K h_{21э}}{h_{11э} + h_{21э} R_э}$$

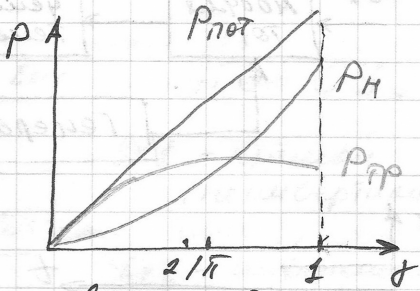
Сигналы действующие на два входа одновременно называются синфазными.

Если в эмиттерную цепь добавить источник смещения, такой, чтоб потенциалы баз относительно земли были нулевыми то базовые резисторы делителя можно исключить.



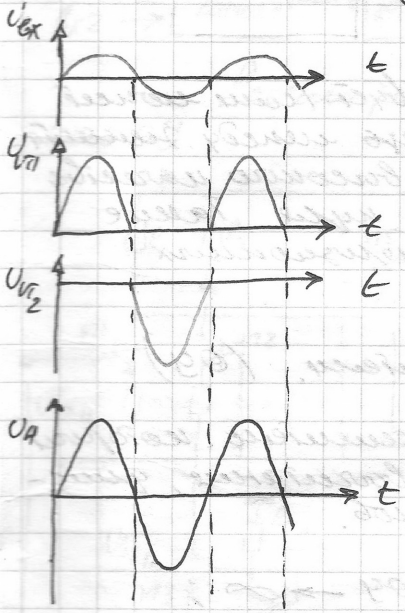
2.15.2. Усилители мощности





Зависимость входной $P_{пот}$, выходной $P_н$ и рассеиваемой мощности в транзисторах от относительной амплитуды γ

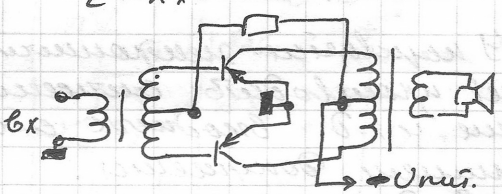
$$P_н = \left(\frac{U_н}{\sqrt{2}}\right)\left(\frac{I_н}{\sqrt{2}}\right) = \frac{(\gamma U_п)^2}{2R_н}.$$



Для двухтактной бестрансформаторной схемы транзисторы работают в классах B и AB.

$$P_{н\,max} = \frac{U_м^2}{2R_н}$$

$$\eta_{max} \approx 0{,}78$$

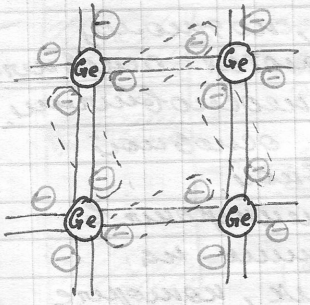


2.15.3. Модулятор - демодулятор.

В данных усилителях постоянный или медленно меняющийся входной сигнал преобразуется (модулируется) в переменный побочной гармоники. Далее сигнал усиливается с помощью усилителя переменного тока, а затем вновь преобразуется (демодулируется) в постоянный или медленно меняющийся.

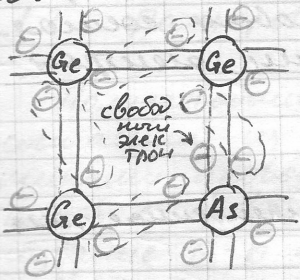
германий Ge, кремний Si, селен Se, мышьяк - As, бор B и др., а так же соединения из двух и более элементов: арсенид галия - Ga As, антимонид индия - In Sb, теллурид висмута - Bi_2Te_3 и др.

Рассмотрим кристаллическую решетку германия.

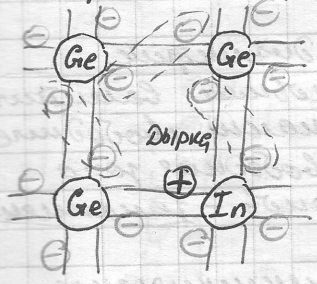


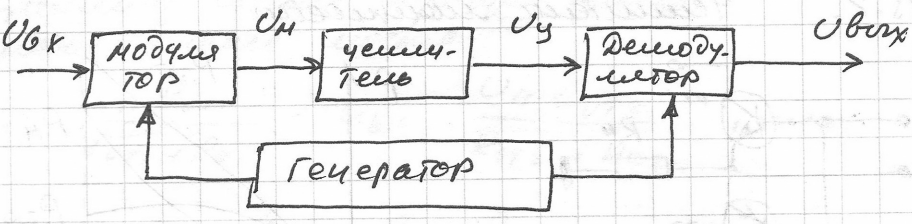
Напомним, что электроны, расположенные на внешней орбите атома вещества называют валентными. В кристалле германия каждый атом вступает в ковалентную (парную) связь с четырьмя ближайшими атомами, т.е. что все 4 валентных электрона участвуют в ковалентных связях.

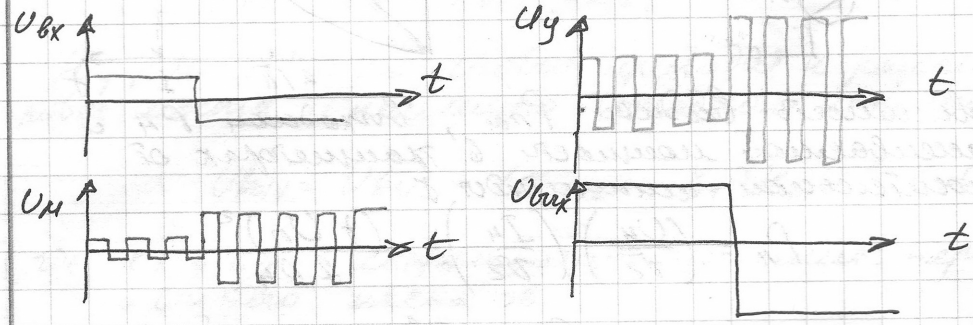
В подобной решетке движение электронов невозможно. Добавим в кристаллическую структуру германия примесь: атомы 5 валентного мышьяка. При этом 4-е электрона мышьяка образуют ковалентную связь, а 5-ый становится свободным. Примесь, что отдает электроны называется донорной. Проводимость, обусловленная движением свободных электронов называется - электронной (n-тип)



Рассмотрим структуру кристаллической решетки германия при введении в него атомов 3-х валентного индия. Атом индия вступает в ковалентную связь с четырьмя атомами германия, но одна связь становится не заполненной. Такая примесь называется акцепторной. Место отсутствия электрона называют - дыркой. При воздействии внешних факторов (например внешнего электрического поля, температуры и т.д.) электроны соседнего атома могут занимать место дырки (т.е. происходит движение дырки). Проводимость такого типа называется - дырочной (p-тип)







В таких усилителях отсутствует (или может отсутствовать) гальваническая связь между элементами, поэтому удается достичь высокого качества усиления, т.к. отсутствует дрейф нуля. Такие усилители используются в прецизионных устройствах.

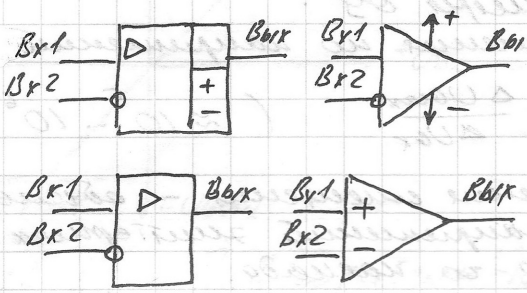
1.16. Операционные усилители (ОУ)

ОУ называется электронный усилитель который может производить сложение, вычитание, умножение и т.д. входных сигналов.

Принцип допущения:

1. Входное сопротивление ОУ $\to \infty$;
2. Выходное сопротивление ОУ $\to 0$;
3. Коэффициент усиления по напряжению ОУ $\to \infty$;
4. В режиме насыщения напряжение на входе равно по модулю напряжению источника питания, а знак определяется полярностью входного сигнала.
5. Синфазный сигнал не усиливается
6. Напряжение смещения нуля $= 0$

7. При нулевом входном сигнале, на выходе ОУ — 0.

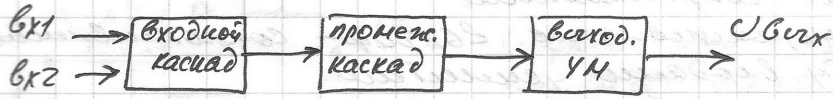


УГО ОУ.

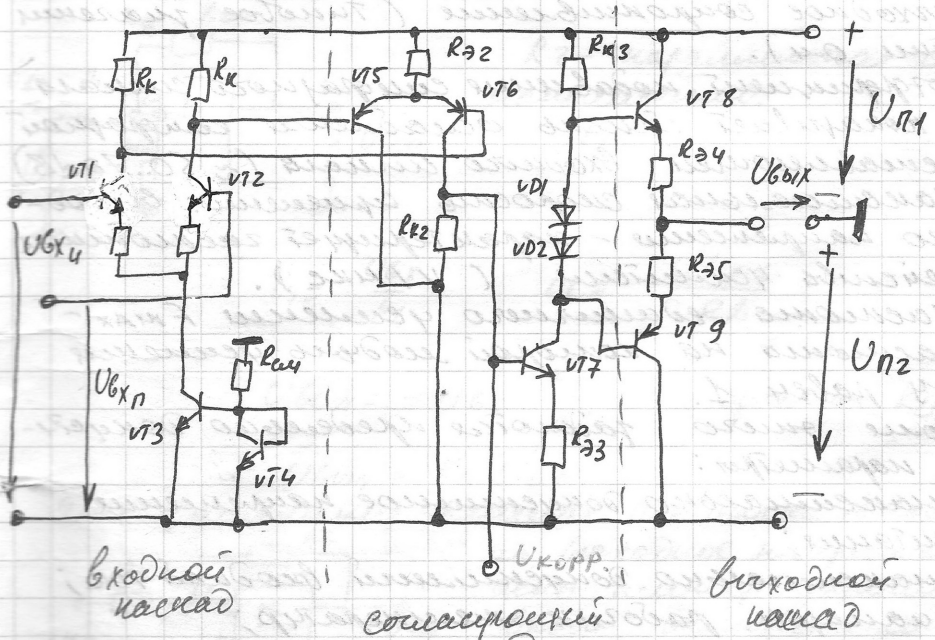
вх 1 – прямой (неинвертирующий);

вх 2 – инверсный (инвертирующий).

Структура ОУ



Рассмотрим упрощенную схему 3каскадного ОУ.



VT1, VT2 – входной дифференциальный усилитель

VT3, VT4 – "токовое зеркало"

VT5, VT6 – диф-ый каскад промежуточного усиления, и согласующий каскад

VT7

VT8, VT9 – усилитель мощности выходного каскада – двухтактная.

Основные параметры ОУ:

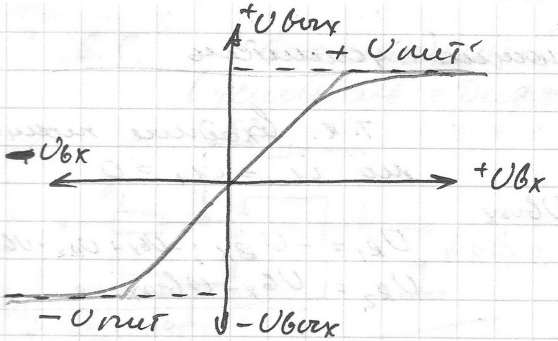
1. Коэффициент усиления по напряжению

$$K_{U_0} = \frac{\Delta U_{вых}}{\Delta U_{вх}} \quad (\approx 10^5 \ldots 10^6)$$

2. Входное напряжение смещения – обусловлено неидентичностью напряжений эмиттерных переходов входного диф-го каскада.
3. Входной ток – ток протекающий во входных выводах ОУ.
4. Входное сопротивление
   – дифференциальное $R_{вх\,диф}$ – сопротивление между входами усилителя
   – синфазное входное сопротивление – сопротивление между объединенными входами и общим проводом.
5. Выходное сопротивление (типовое значение сотни ом).
6. Коэффициент подавления синфазного сигнала – показывает степень ослабления синфазной составляющей входного сигнала ($\approx 50 \ldots 70$ dB).
7. Максимальная скорость нарастания выходного напряжения – характеризует частотные свойства усилителя (V/мкс).
8. Частота единичного усиления F_{max} – – частота на которой модуль усиления ОУ равен 1.

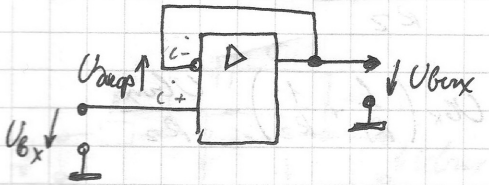
Кроме этого задаются предельно допустимые параметры:

- максимально допустимое напряжение питания;
- максимально допустимый входной ток;
- диапазон рабочих температур;
- максимально допустимая мощность;
- максимально допустимое входное синфазное напряжение;
- — " — дифференциальное напряжение;
- и др.



— идеальный ОУ
— реальный ОУ.

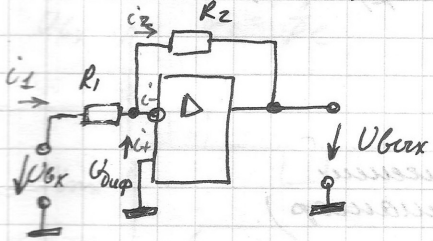
2.16.1. Повторитель напряжения.



$U_{вх} = U_{вых}$

Служит для согласования каскадов усиления.

2.16.2. Инвертирующий усилитель.



R_2 – параллельная ОС по напряжению.

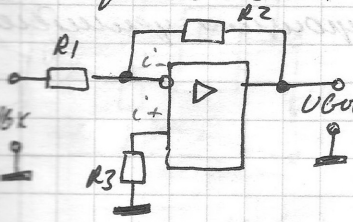
$i_1 = i_2$

$$i_1 = \frac{U_{вх}}{R_1} \qquad i_2 = -\frac{U_{вых}}{R_2}$$

$$U_{вых} = -U_{вх}\frac{R_2}{R_1}$$ обозначим $K_U = -\frac{R_2}{R_1}$

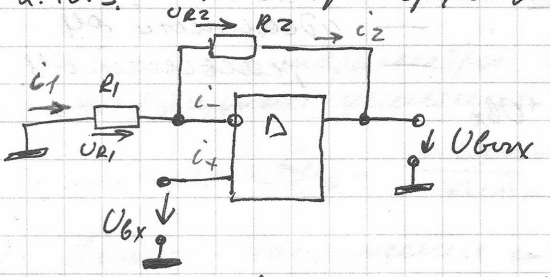
$$U_{вых} = K_U U_{вх}$$

Для уменьшения влияния входных токов ОУ на выходное напряжение в цепь неинвертирующего входа включают сопротивление:



$$R_3 = R_1 \parallel R_2 = \frac{R1\,R2}{R1+R2}$$

2.16.3. Неинвертирующий усилитель



т. к. входные токи = 0
то $i_{1-} = i_{1+} = 0$

$U_{R1} = -U_{вх}$; $-U_{вх} + U_{R2} + U_{вых} = 0$

$U_{R2} = U_{вх} - U_{вых}$

$$i_1 R_1 = -U_{вх} \qquad i_2 R_2 = U_{вх} - U_{вых}$$

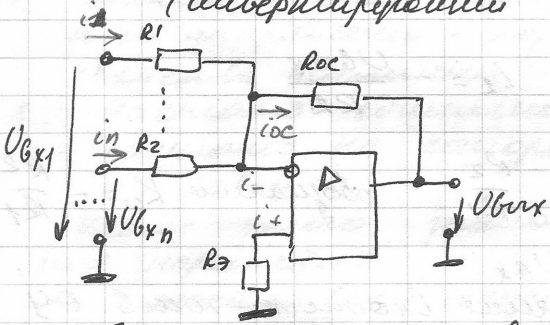
$$i_1 = -\frac{U_{вх}}{R_1} \qquad i_2 = \frac{U_{вх} - U_{вых}}{R_2}$$

$$-\frac{U_{вх}}{R_1} = \frac{U_{вх} - U_{вых}}{R_2} \Rightarrow U_{вх}\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) = \frac{U_{вых}}{R_2}$$

$$U_{вых} = U_{вх}\frac{R_1 + R_2}{R_1} = U_{вх}\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right), \text{ откуда}$$

$$K_u = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

2.16.4. Сумматор напряжений (инвертирующий сумматор).

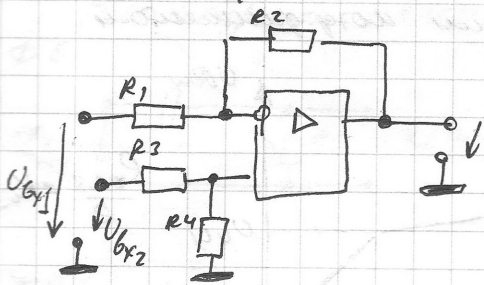


По аналогии с инвертирующим усилителем

$$U_{вых} = -R_{ос} \cdot \sum_{j=1}^{n} \frac{U_{вх\,j}}{R_j}$$

$$R_э = R_1 \parallel R_2 \parallel \ldots \parallel R_{ос}$$

2.16.5. Вычитающий усилитель
(усилитель с дифференциальным входом)

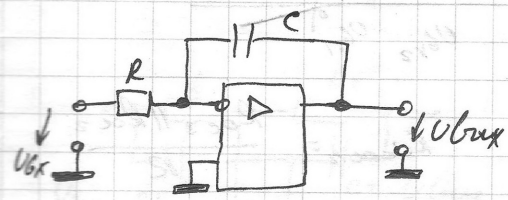


При равенстве

$R_1 = R_2 = R_3 = R_4$

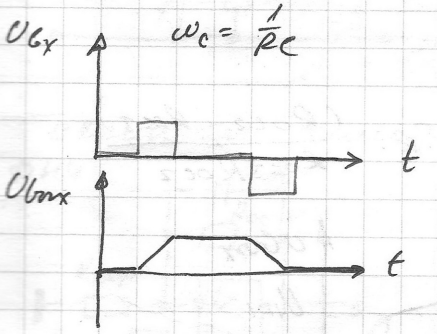
$U_{вых} = U_{вх2} - U_{вх1}$.

2.16.6. Интегратор.



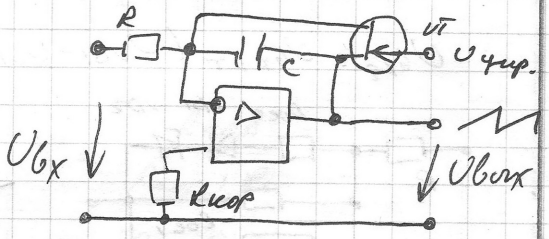
$$\frac{U_{вх}}{R_1} = -C\frac{dU_{вых}}{dt}$$

$$U_{вых} = -\frac{1}{RC}\int U_{вх}\,dt$$

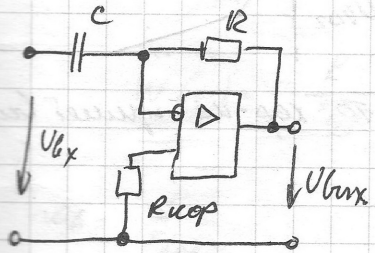


$\omega_c = \frac{1}{RC}$

$$W_u(p) = \frac{K_{U_0}}{RC(K_{U_0}+1)p + 1}$$



2.16.6. Дифференцирующий усилитель.
(дифференциатор).



$$\frac{U_{вых}}{R} = -C\frac{dU_{вх}}{dt}$$

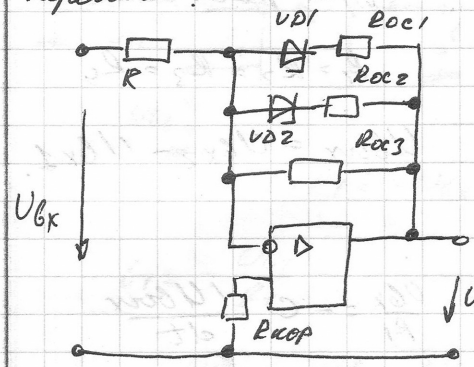
$$U_{вых} = -RC\frac{dU_{вх}}{dt}$$

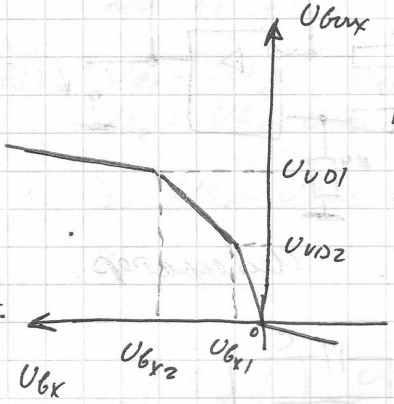
$$W_д(p) = \frac{RCp}{\frac{RCp}{K_{U_0}+1} + 1}$$

$\omega_c = \frac{1}{RC}$

2.16.7. Нелинейные преобразователи.

Усилитель с убывающим коэффициентом передачи.



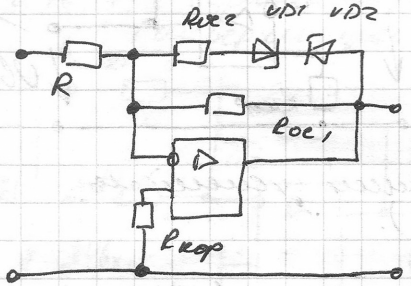


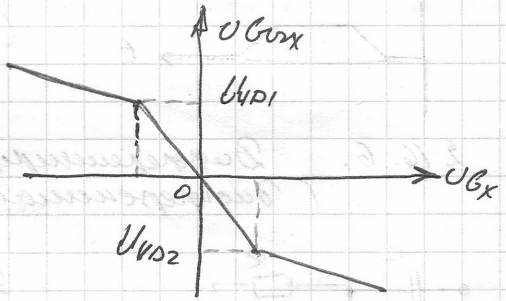
$$\frac{R_{oc3}}{R} = K_{uooc1}$$

$$K_{uooc3} = \frac{R_{oc3} \parallel R_{oc2} \parallel R_{oc}}{R} \qquad K_{uooc2} = \frac{R_{oc3} \parallel R_{oc2}}{R}$$

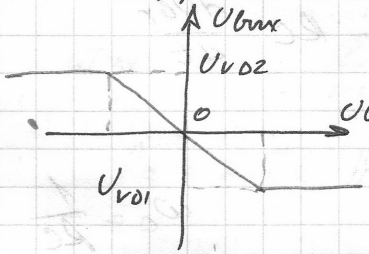
$$U_{вх1} = \frac{U_{вых}}{K_{uooc1}} = \frac{U_{VD2} R}{R_{oc3}}$$

$$U_{вх2} = U_{вх1} + (U_{VD1} - U_{VD2}) \cdot R \cdot \frac{(R_{oc2} + R_{oc3})}{R_{oc3} R_{oc2}}$$





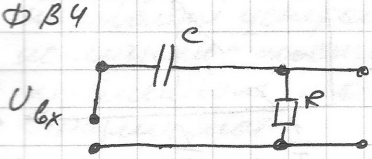
если убрать R_{oc2} и R_{oc1}, то хар-ка имеет вид:

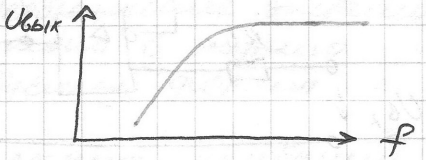


2.16.8. Фильтры на ОУ.

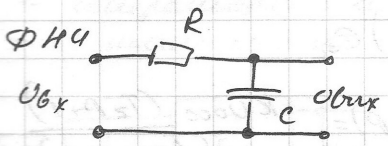
Рассмотрим пассивные фильтры

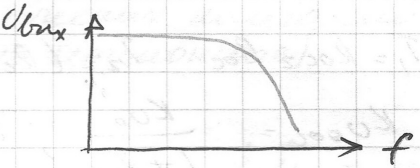
ФВЧ

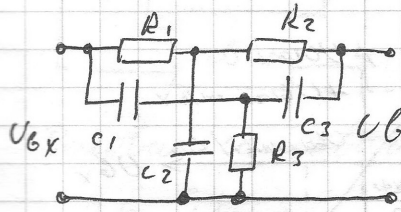


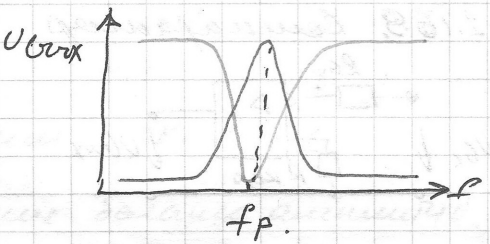


ФНЧ



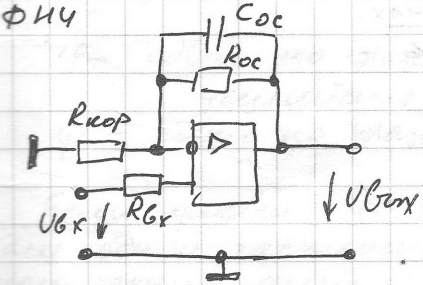






активные фильтры:

ФНЧ



$$K = \frac{R_{кор}}{R_{кор} + R_{ос}}$$

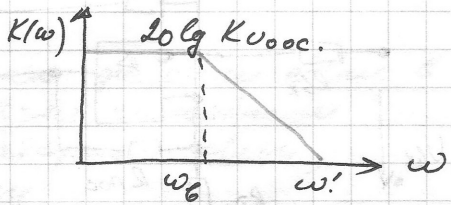
$$T_1 = R_{ос} C_{ос}.$$

$$T_2 = \frac{R_{ос} R_{кор} C_{ос}}{R_{кор} + R_{ос}}$$

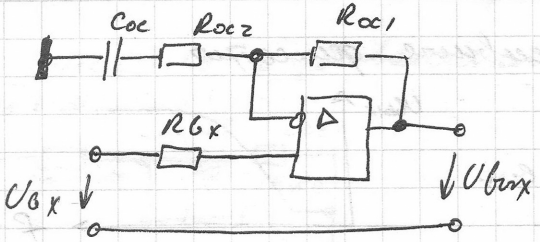
$$W(p) = \frac{K(T_1 p + 1)}{T_2 p + 1}$$

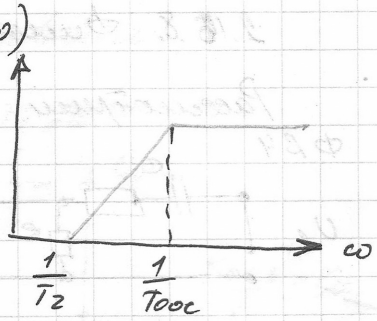
$$\omega_б = \frac{1}{T_{оос}}$$

$$\omega' = \frac{1}{T_2}$$



ФВЧ.

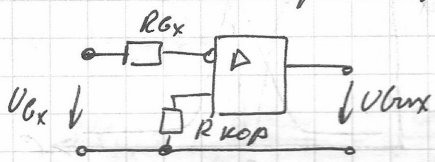


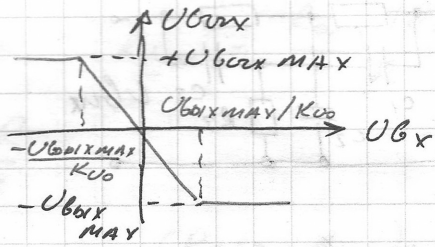


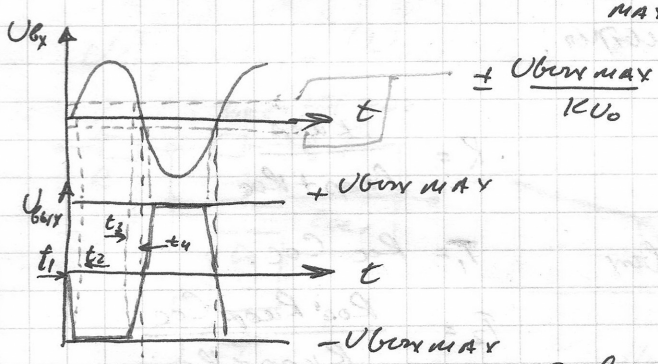
$T_1 = R_{oc2} C_{oc} \quad T_2 = (R_{oc1} + R_{oc2}) C_{oc}$

$$K_{U\,ooc} = \frac{K_{U0}}{1 + K_0}, \quad W_{оч\,ooc}(p) = \frac{K_{U\,ooc}(T_2 p + 1)}{(T_{ooc} + 1)}$$

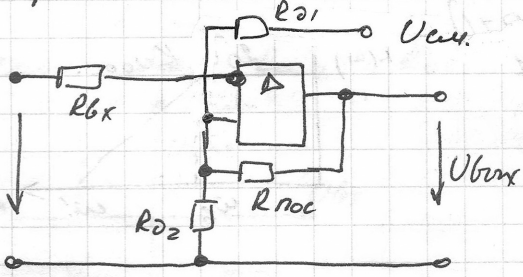
2.16.9. Компаратор.

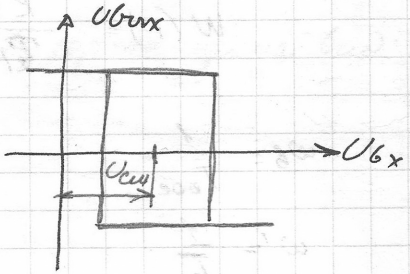






Сравнение с гадаемой величиной



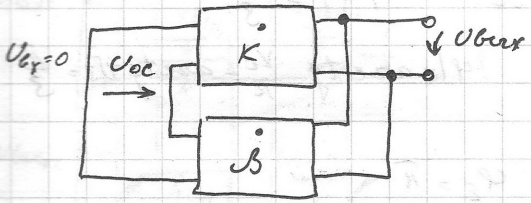


2.17. Генераторы.

2.17.1 Общие положения

Генератором электрических колебаний называют устройство преобразующее энергию источника постоянного тока в энергию переменного тока требуемой формы.

Различают:
- генераторы гармонических колебаний
- генераторы негармонических колебаний (импульсные или релаксационные).



$$\dot{U}_{вых} = \dot{K} \cdot \dot{U}_{ос} =$$

$$= \dot{K} \cdot \dot{U}_{вых} \cdot \dot{\beta}$$

Условие самовозбуждения: $\dot{K} \cdot \dot{\beta} = 1$.

$|\dot{K} \cdot \dot{\beta}| = 1$ – уравнение баланса амплитуд.

$\varphi + \psi = 2\pi n$, $n = 0, 1, 2 \ldots$ – условие баланса фаз.

φ – сдвиг по фазе для цепи прямой передачи (усилителя)

ψ – сдвиг по фазе для цепи ОС.

Если условие $\dot{K} \cdot \dot{\beta} = 1$ выполняется только для одной частоты, то на выходе будет гармонический сигнал, если для нескольких частот, то сигнал на выходе будет несинусоидальным.

В реальных генераторах фазовый сдвиг в канале ОС осуществляется 2-мя способами:
- посредством трансформаторной связи;
- посредством RC – связи.

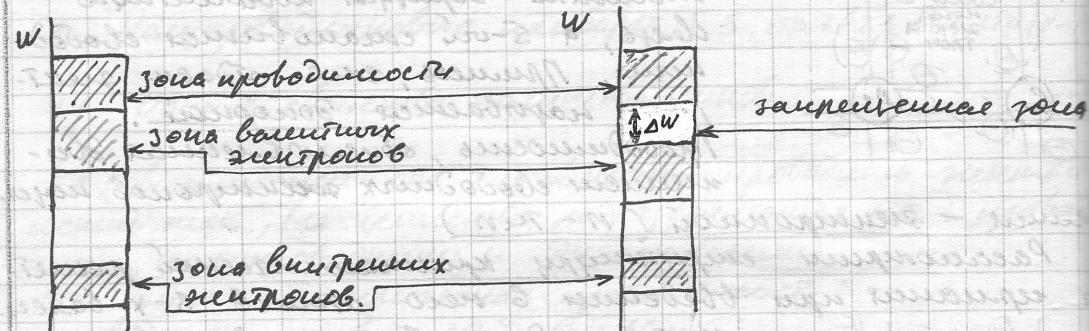
Т.о. к полупроводнику добавляя донорные и акцепторные примеси, можно получить полупроводники с различным типом проводимости — n и p.

На практике не удается получить полупроводник только с донорными или акцепторными примесями, обычно в полупроводниках присутствуют так же свободные электроны и дырки.

В полупроводнике n-типа число свободных электронов превышает число дырок, поэтому электроны (в данном случае) называются основными носителями заряда, а дырки – неосновными.

В полупроводнике p-типа: дырки – основной носитель заряда, электроны – неосновной.

Как известно из курса физики, электроны в атомах вещества могут находиться лишь на определенных энергетических уровнях, которые соответствуют различным квантовым состояниям. В соответствии с квантово-механической теорией строения атома в каждом квантовом состоянии может находиться только один электрон.

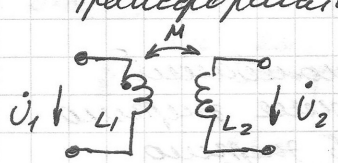


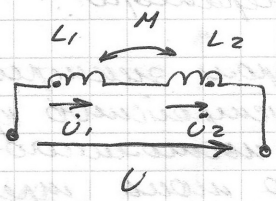
проводник полупроводники и диэлектрик

У проводников к энергетическим уровням валентных электронов непосредственно примыкают свободные. У полупроводников и диэлектриков свободная зона отделена от зоны валентных электронов – запрещенной зоной.

Если к проводнику приложить электрическое поле, то даже при незначительной величине напряженности, его электроны смогут перейти на более высокие свободные энергетические уровни и перемещаться в проводнике (потечет ток).

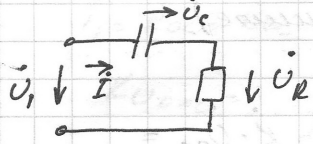
Трансформаторная:

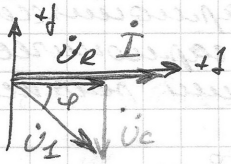




$\psi = \psi_1 - \psi_2 = \pi$

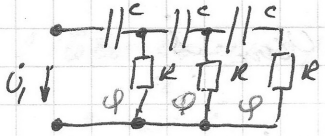
RC:





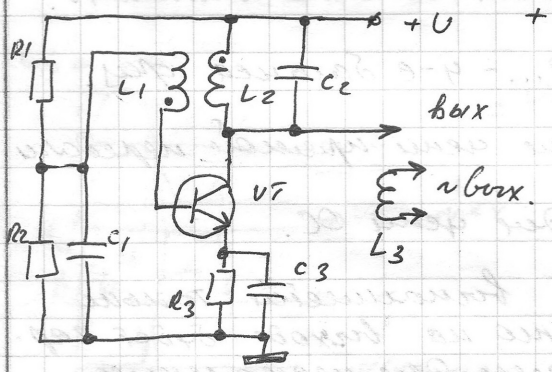
$|\varphi| = \frac{\pi}{3}$

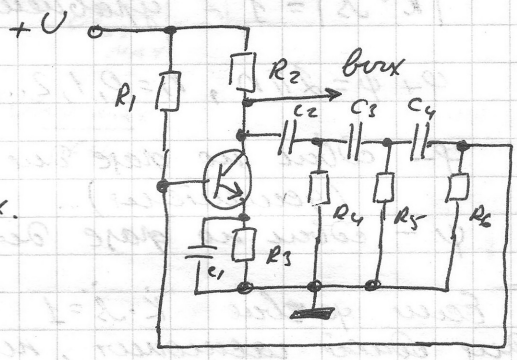
$X_c = \sqrt{3}\,R \qquad |\varphi| = \operatorname{arctg}\frac{X_c}{R} = \operatorname{arctg}\sqrt{3} = \frac{\pi}{3}$



$\varphi = \frac{\pi}{3} \qquad \varphi_\Sigma = \pi$

Генератор с LC контуром и RC цепью.





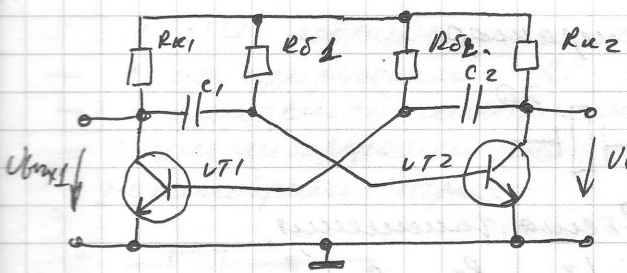
2.17.2. Мультивибраторы.

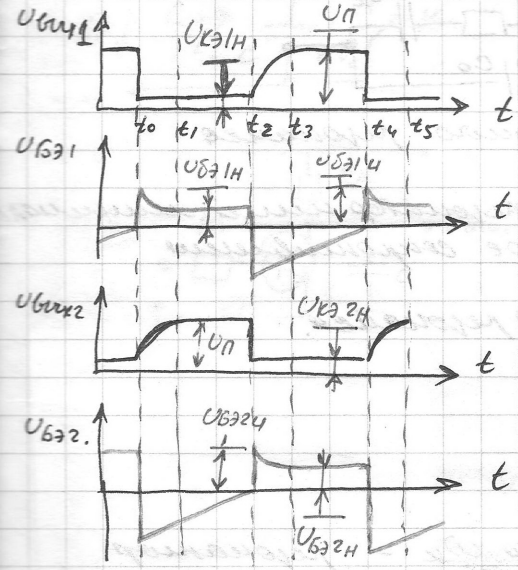
мультивибратор (multy – много, vibro – колебание) – релаксационный генератор импульсов почти прямоугольной формы, выполненный в виде усилительного устройства с ПОС.

Различают два вида мультивибраторов:

— автоколебательные;

— ждущие (одновибраторы).

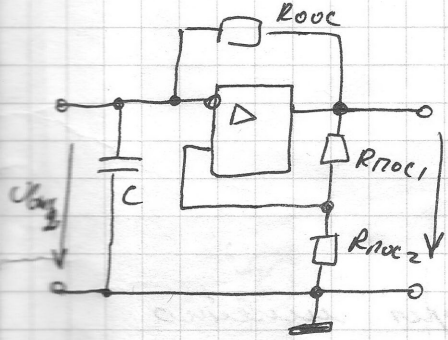


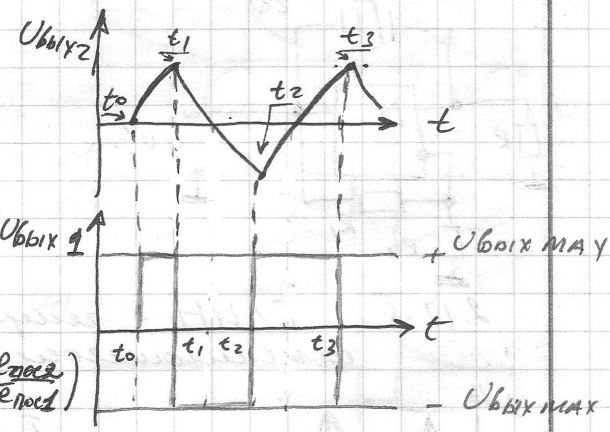


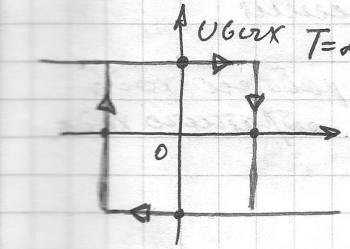
Для симметричного мультивибратора

$$f \approx \frac{0{,}715}{R_б C}$$

2.17.3. Генераторы на ОУ.



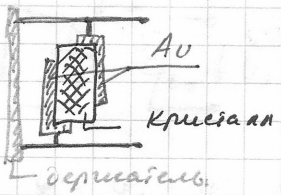




$$T = 2RC \ln\left(1 + 2\frac{R_{пос2}}{R_{пос1}}\right)$$

Данная схема требует стабилизации амплитуды ч-з напряжения выходных переключателей ОУ.

2.17.4. Кварцевый генератор.



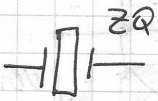
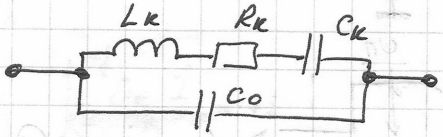


Схема замещения.



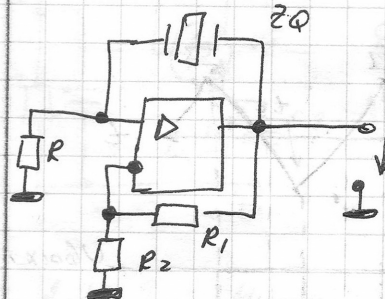
Частота последовательного резонанса

$$\omega_к \approx \frac{1}{\sqrt{L_к C_к}}$$, - резонатор имеет минимальное сопротивление

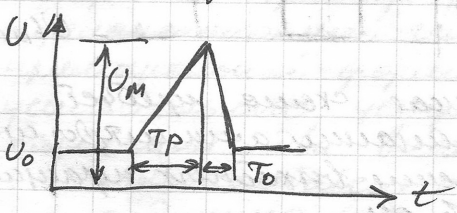
Частота параллельного резонанса.

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{L_к \frac{C_к C_o}{C_к + C_o}}}$$

в диапазоне между ω_o и $\omega_к$ - резонатор ведет себя как индуктивность.



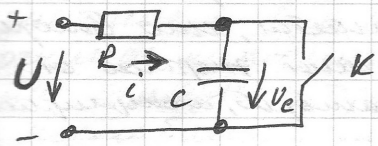
2.17.5. ГЛИН - генераторы линейно изменяющегося напряжения.

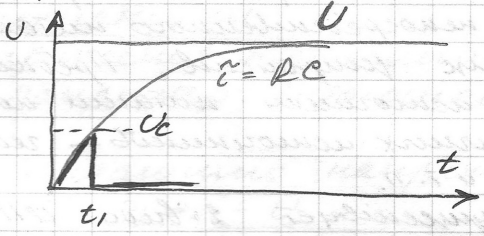


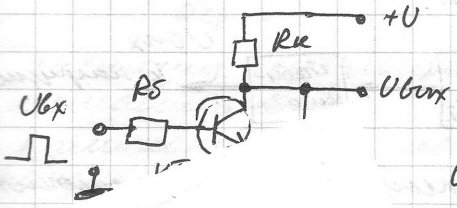
T_p - время рабочего хода
T_o - время обратного хода.

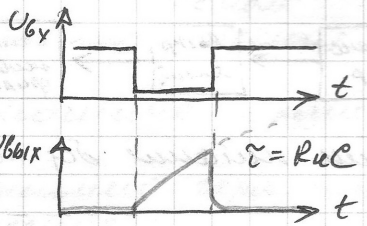
ГЛИН подразделяются на 3 типа:
- с интегрирующей RC цепочкой;
- с токостабилизирующим двухполюсником;
- с компенсирующей ОС.

Рассмотрим первый.



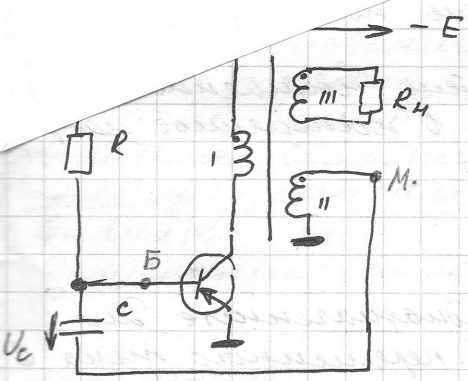


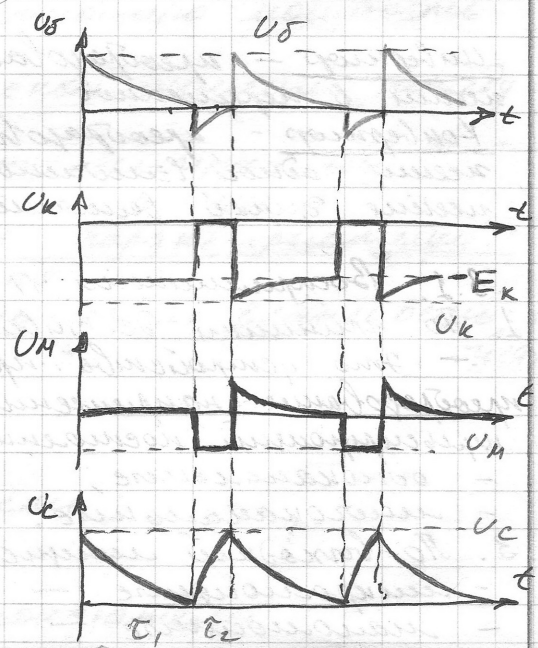




...раторы

...оугольных импульсов
...микросекунды до долей





$\tau_1 = RC$

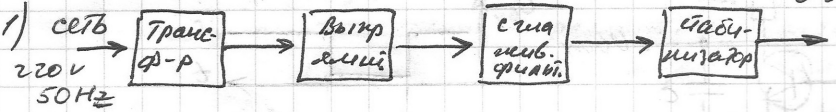
$\tau_2 = R_{вх} \cdot C$

$r_{вх} \ll R$

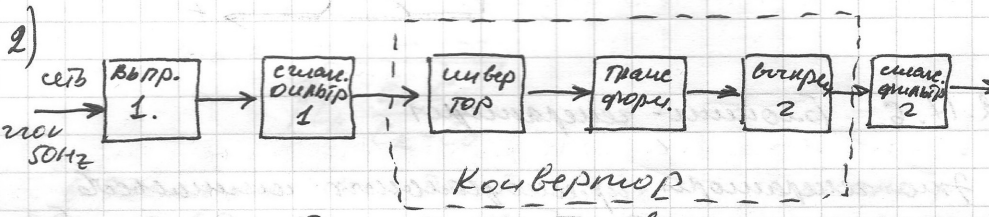
3. Источники вторичного электрического питания (ИВЭП)

Вторичные источники питания предназначены для получения напряжения, необходимого для непосредственного питания электронных и других устройств. Предполагается, что вторичные источники питания получают энергию от первичных источников — генераторов, аккумуляторов и т. п.

Существует 2 вида ИП:

1) 

Источник питания без преобразования частоты.

2) 

Источник питания с преобразованием частоты.

<u>Инвертор</u> — преобразователь постоянного напряжения в переменное

<u>Конвертор</u> - преобразователь постоянного напряжения одной величины в постоянное напряжение другой величины

Классификация ИВЭП

1. По принципу действия:
   - трансформаторные;
   - бестрансформаторные.
2. По количеству выходных напряжений:
   - одноканальные;
   - многоканальные.
3. По выходной мощности ИВЭП:
   - микромощные — $P \leq 1$ W;
   - маломощные — $1 < P \leq 100$ W;

- средней мощности — $100 < P \leq 1000$ Вт;
- мощные — $P > 1$ кВт.

Основные характеристики ИВЭП можно разделить на 3 группы:

1) Входные характеристики:
- значение и вид напряжения первичного источника питания (например: питающей сети, аккумулятора);
- нестабильность питающего напряжения:

$$\delta U_c = \frac{\Delta U_c}{U_c} = \frac{U_{c\,max} - U_{c\,min}}{U_{c\,ном}}$$

- частоту питающего напряжения и её нестабильность;
- количество фаз источника переменного напряжения;
- допустимый коэффициент гармоник питающего напряжения.

2) Выходные характеристики:
- значения выходных напряжений;
- нестабильность выходных напряжений

$$\delta U_{вых} = \frac{\Delta U_{вых}}{U_{вых}} = \frac{U_{вых\,max} - U_{вых\,min}}{U_{вых\,ном}}$$

- ток нагрузки или выходную мощность каждого канала;
- наличие гальванической изоляции между входом и выходом;
- наличие защиты от перегрузки или повышения выходного напряжения.

3) Эксплуатационные характеристики:
- диапазон рабочих температур;
- допустимая относительная влажность;
- диапазон допустимых давлений окружающей среды;
- допустимые механические нагрузки;
- КПД ИВЭП;
- удельная мощность;
- надежность;
- габариты.
- Эргономические показатели.

Коэффициент стабилизации по напряжению:

$$K_{U_{ст}} = \frac{\frac{\Delta U_{вх}}{U_{вх\,ном}}}{\frac{\Delta U_{вых}}{U_{вых\,ном}}}$$

Коэффициент пульсаций:

$$\varepsilon = \frac{U_{mi}}{U_{ср}}$$, где U_{mi} – амплитуда переменной составляющей пульсирующего напряжения (1-я гарм.)

Коэффициент сглаживания:

$$q = \frac{\varepsilon_{вх}}{\varepsilon_{вых}}$$ – это способность процесса изменять переменную составляющую входного напряжения.

3.1. Выпрямители.

– это преобразование переменного напряжения в пульсирующее.

Основные параметры выпрямителей:

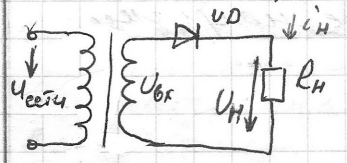
– средние значения выходного напряжения

$$U_{ср} = \frac{1}{T}\int_0^T u_{вых}\,dt$$

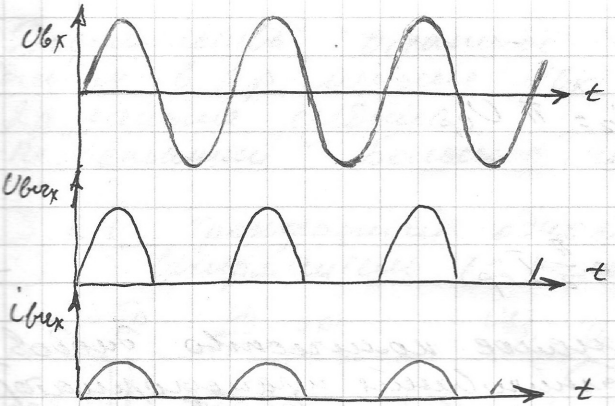
– среднее значение выходного тока

$$I_{ср} = \frac{1}{T}\int_0^T i_{вых}\,dt$$

3.1.1. Однофазный однополупериодный выпрямитель



Ток в нагрузке протекает в течение полупериода действия входного напряжения.



$$U_{ср} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_{вх}$$

$$U_{вх} \approx 2,22\, U_{ср}$$

$$I_{ср} = \frac{U_{ср}}{R_н}$$

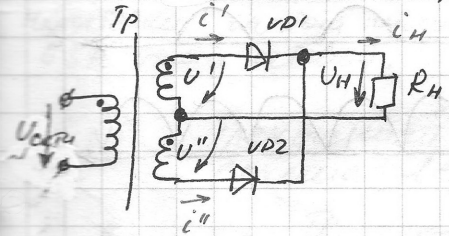
$$\varepsilon = \frac{\pi}{2} = 1,57$$

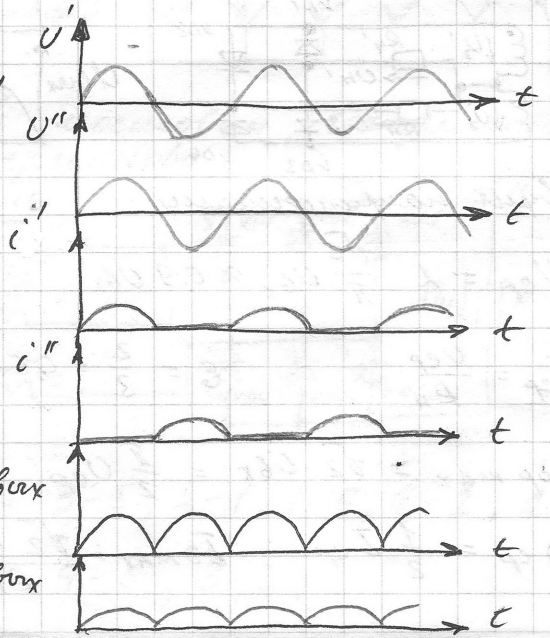
$$U_{обр\,max} = \sqrt{2}\, U_{вх}, \quad I_{д\,ср} = I_{ср}, \quad I = 0,5\, I_m$$

$$I_{д\,max} = \sqrt{2}\, \frac{U_{вх}}{R_н} = \pi I_{ср}.$$

Такой выпрямитель имеет ограниченное применение в маломощных цепях (U↑ I↓ - высоковольт.)
Достоинства: используется только один диод.
Недостатки: Протекание постоянной составляющей тока во входной цепи. (подмагн. трансф.)

3.1.2. Однофазный двуполупериодный выпрямитель со средней точкой.





$$U_{ср} = 2\, \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 \approx 0,9\, U_2$$

U_2 - действ. знач. к-ой полуобмотки

$$U_2 \approx 1,11\, U_{ср}$$

$$I_{ср} = \frac{U_{ср}}{R_н}$$

$$\varepsilon = \frac{2}{3} \approx 0{,}67$$

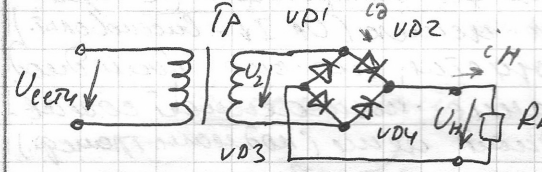
$$U_{обр\,max} = 2\sqrt{2}\,U_2 = \pi\,U_{ср}$$

$$I_{д\,ср} = \frac{1}{2}\,I_{ср}$$

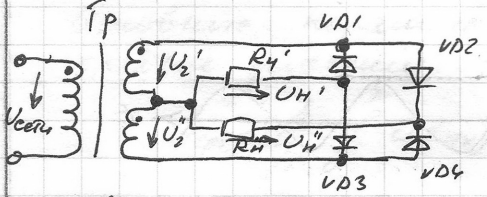
$$I_{д\,max} = \sqrt{2}\,\frac{U_2}{R_н} = \frac{\pi}{2}\,I_{ср}.$$

Достоинства: - малое количество диодов, отсутствие подмагничивания трансформатора.
недостатки: необходим трансформатор с отводом от середины, на диодах приложено двойное амплитудное значение напряжения.

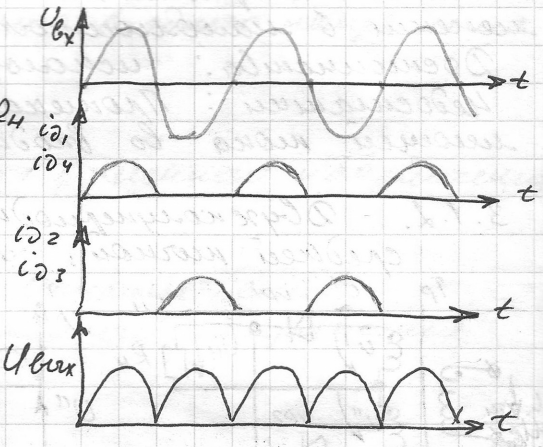
3.1.3. Однофазный мостовой выпрямитель.



С одним напряжением.



С двумя напряжениями.



$$U_{ср} = 2\,\frac{\sqrt{2}}{\pi}\,U_{вх} \approx 0{,}9\,U_{вх} \qquad U_{вх} \approx 1{,}11\,U_{ср}$$

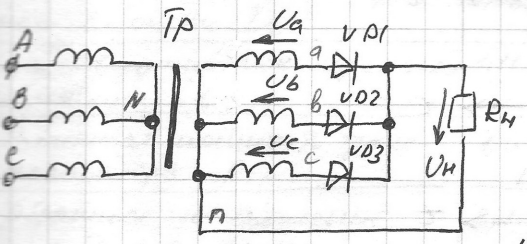
$$I_{ср} = \frac{U_{ср}}{R_н} \qquad \varepsilon = \frac{2}{3} = 0{,}67$$

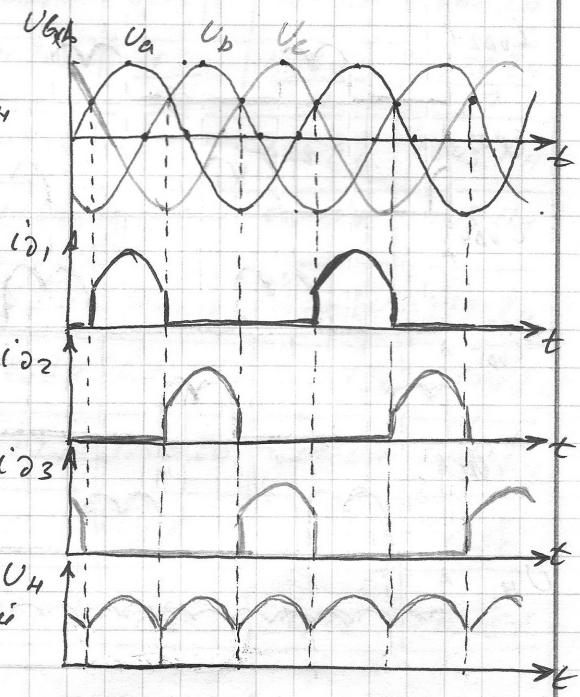
$$U_{обр\,max} = \sqrt{2}\,U_{вх} = \frac{\pi}{2}\,U_{ср}$$

$$I_{д\,ср} = \frac{1}{2}\,I_{ср} \qquad I_{д\,max} = \frac{\sqrt{2}\,U_{вх}}{R_н} = \frac{\pi}{2}\,I_{ср}$$

Достоинства: обратное напряжение на диодах в 2р меньше $U_{вх}$, ток диодов в 2р меньше среднего.
Недостатки: Большое количество диодов (4).

3.1.4. Трехфазный однополупериодный выпрямитель (с нулевым выводом).





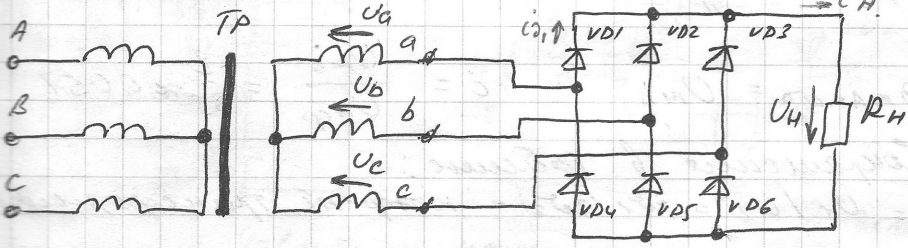
$$U_{нер} = \frac{3\sqrt{3}\,U_{mф}}{2\pi} \approx$$

$$\approx 0{,}827\,U_{mф}$$

$$\varepsilon = \frac{U_{m3}}{U_{нер}} = 0{,}25$$

Достоинства: малые пульсации $U_н$
Недостатки: частота пульсаций в 3р выше сетевой.

3.1.5. Трехфазный мостовой выпрямитель (схема Ларионова).



Диоды работают: 3-5, 5-1, 1-6, 6-2, 2-4, 4-3, 3-5.

В полупроводниках и диэлектриках электрону необходимо сообщить дополнительную энергию для преодоления запрещенной зоны.

Для проводников $\Delta W = 0$ эв.

Для диэлектриков $\Delta W = 5-20$ эв.

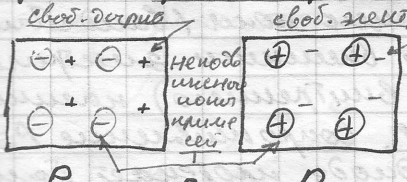
Для полупроводников $\Delta W = 0{,}5-5$ эв.

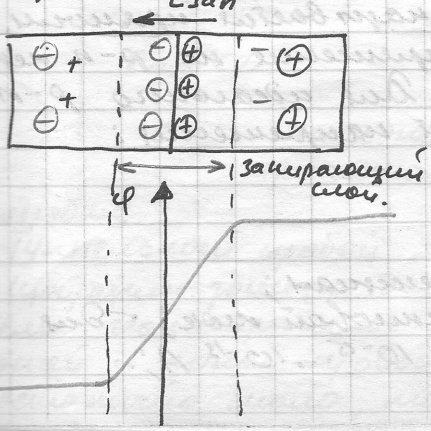


донорная примесь — акцепторная примесь.

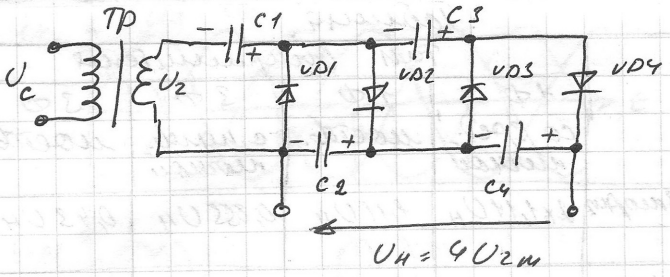
1.2. Полупроводниковые диоды.

Полупроводниковым диодом называется прибор, состоящий из двух полупроводников с различными типами проводимостей. Контакт двух полупроводников с проводимостями p и n типа получил название p-n перехода.



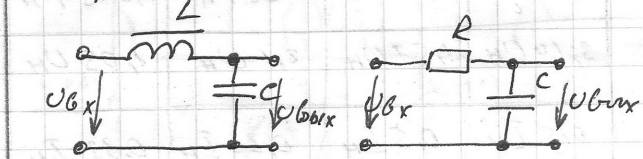


В несоприкасающихся p и n областях, подвижные носители заряда распределены равномерно. (неосновные по ним). При соприкосновении полупроводников в пограничном слое происходит рекомбинация электронов и дырок: электрон из n-зоны занимает свободные уровни в валентной зоне p. В результате вблизи границы двух полупроводников образуется слой, лишенный подвижных носителей заряда и потому обладающий высоким электрическим

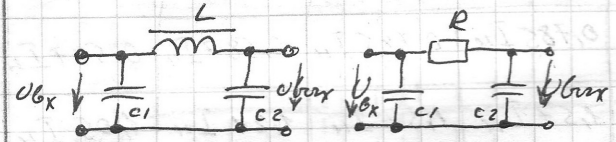


3.2. Фильтры

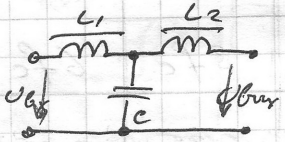
Предназначены для уменьшения пульсаций напряжения на выходе.



LC и RC "Г"-образные



LC и RC "П"-образные



LC "Т"-образный

3.3. Стабилизаторы

3.3.1. Характеристики стабилизаторов

Коэффициент стабилизации

$$K_{ст} = \frac{\frac{\Delta U_{вх}}{U_{вх}}}{\frac{\Delta U_{вых}}{U_{вых}}}$$

Выходное сопротивление

$$R_{вн} = \frac{\Delta U_{вых}}{\Delta I_{вых}}$$

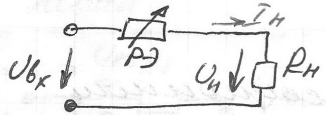
3.3.2. Классификация стабилизаторов.

1. Параметрические стабилизатор — принцип действия основан на использовании нелинейной ВАХ элементов (стабистора, стабисистора, барретера, варистора)

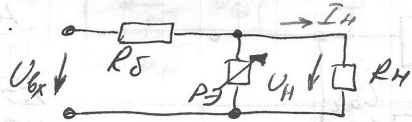
2. Компенсационные стабилизаторы — принцип действия основан на замкнутой системе регулирования с ООС. Различают
   а) непрерывные компенсационные стабил-ры;
   б) ключевые стабилизаторы.

В зависимости от места включения регулирующего элемента стабилизаторы делятся:

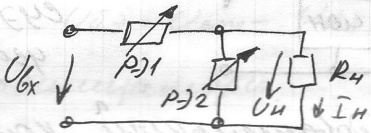
- последовательные:



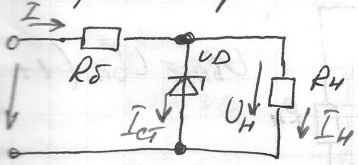
- параллельные:



- последовательно-параллельные или смешанные:



3.4. Параметрический стабилизатор

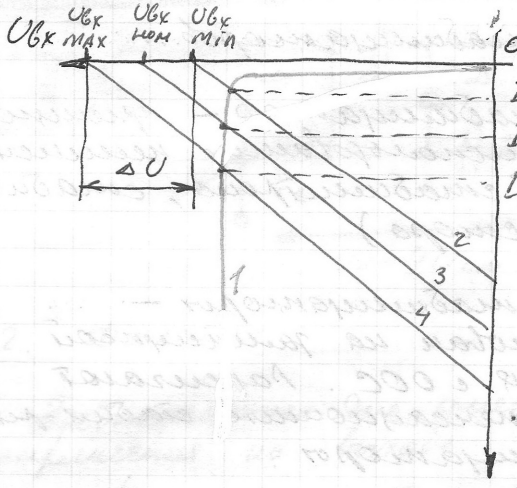


Это параллельная схема стабилизации

A/A ? $I_{ст\ ном} = \dfrac{I_{ст\ max} - I_{ст\ min}}{I_{ст\ ном}}$

$U_{ст} = const$

$R_б = \dfrac{U_{вх} - U_н}{I_н + I_{ст\ ном}}$



1 - ВАХ стабилитрона

2 - линия нагрузки при Iст min

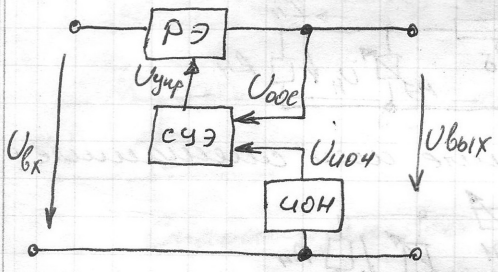
3 - -"- при Iст ном

4 - -"- при Iст max

Достоинства: малое число деталей

Недостатки: малый коэффициент стабилизации.

3.5. Компенсационный стабилизатор

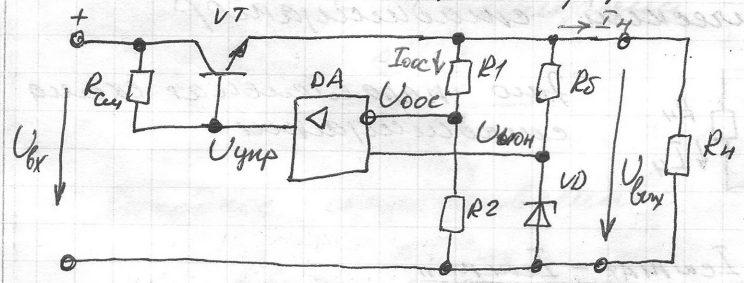


РЭ - регулирующий элемент

ИОН - источник опорного напряжения

СУЭ - сравнивающий и усиливающий элемент.

3.5.1. Последовательный компенсационный стабилизатор непрерывного типа



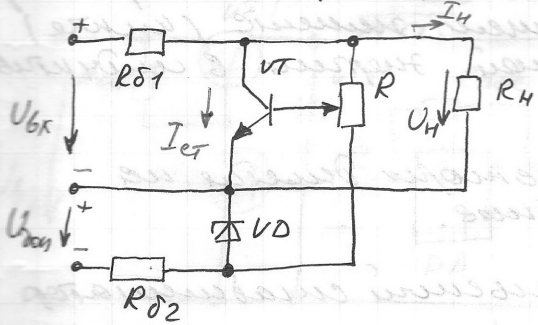
$$U_{вых} = U_{оп}\left(1 + \frac{R1}{R2}\right)$$

$U_{вых} \uparrow \quad U_{R2} \uparrow \quad U_{бVT} \downarrow \quad U_{вых} \downarrow$

Достоинства: высокий коэффициент стабилизации;

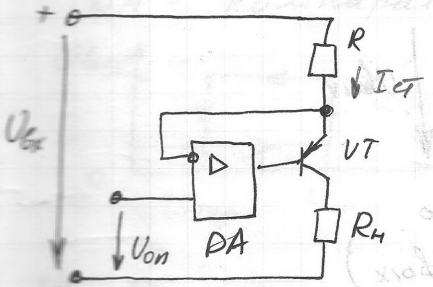
Недостатки: низкий КПД

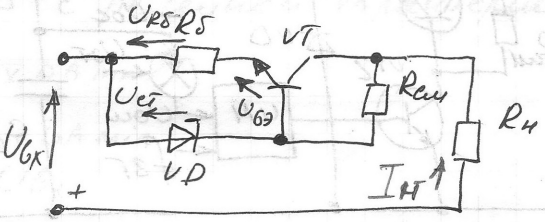
3.5.2. Параллельной компенсационный стабилизатор



$U_{вых} \uparrow U_{бэ} \uparrow I_{ст} \uparrow U_н \downarrow$

3.6. Стабилизатор тока





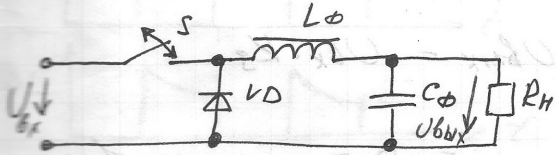
$U_{бэ} + U_{Rб} - U_{ст} = 0$

$U_{бэ} = U_{см} - U_{Rб}$

Недостаток: низкий КПД.

3.7. Ключевые стабилизаторы.

Регулирующий элемент работает в ключевом режиме (включен - выключен).



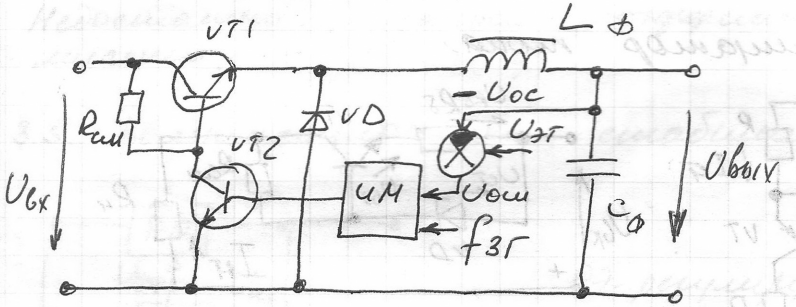
В индуктивности и емкость энергия поступает "порциями", регулируя величину этих "порций" можно стабилизировать выходные параметры: напряжение, ток, мощность, при изменяющихся параметрах сети и нагрузки.

Достоинства: – КПД до 70 ÷ 80 %;
– лучшие масс-габаритные показатели;
– часто исключается сетевой трансформатор на 50 Hz.

Диод необходим для исключения перенапряжений на регулирующем элементе (ключе) и передачи накопленной энергии в емкостность на нагрузку.

Ключевые стабилизаторы делятся на импульсные и релейные.

Рассмотрим импульсный стабилизатор



$U_{ом} = U_{зг} - U_{ос}$ $(U_{ос} = U_{вых})$

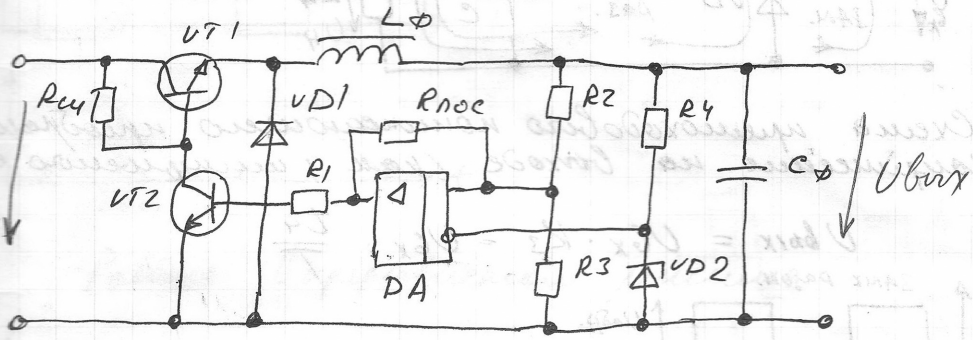
ИМ – импульсный модулятор
Частота переключения ключа VT1 – постоянна и задается генератором fзг.
Импульсный модулятор управляет заполнением импульсов, коэффициент заполнения

$$K_з = \frac{t_и}{T}, \quad U_{вых} = U_{вх} \cdot K_з$$

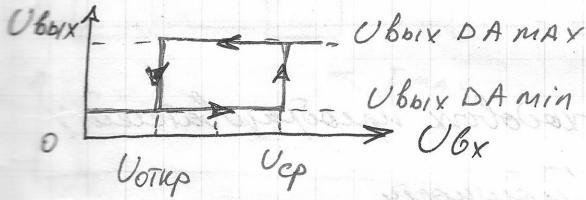
В качестве ИМ может быть использован
– мультивибратор
– компаратор (на один вход подается напряжение ошибки, на второй – синхронизирующее напряжение специальной или произвольной формы.

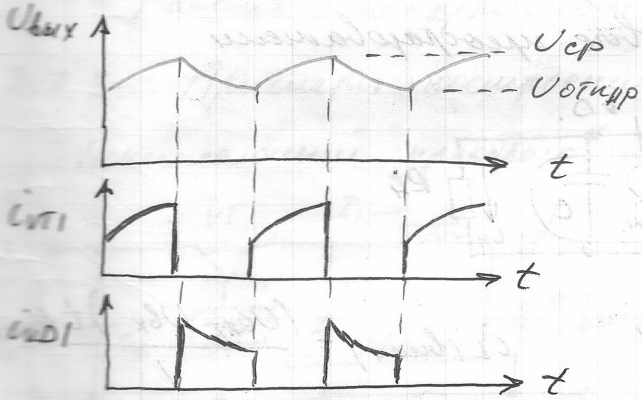
Рассмотрим релейный стабилизатор.

Частота срабатывания регулирующего элемента зависит от параметров сети и нагрузки (не постоянная)



R4 VD2 – эталонное напряжение
DA – компаратор с релейной характеристикой





У такого стабилизатора пульсации напряжения на выходе больше чем у интегрального

3.7. Импульсные преобразователи

3.7.1. Прямоходовый преобразователь:

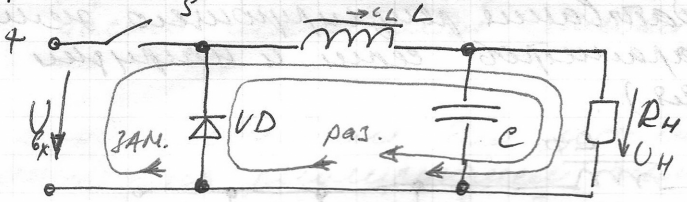
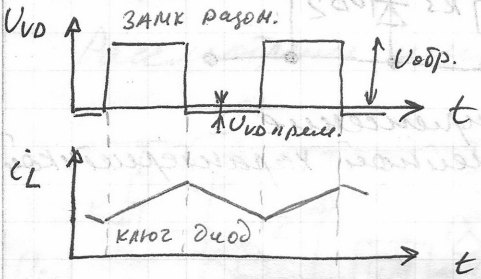


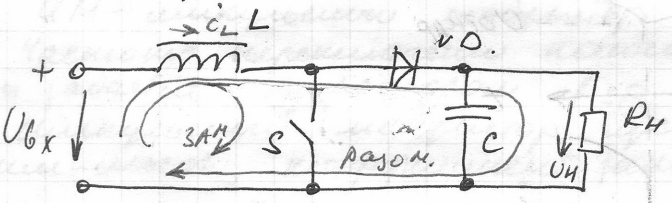
Схема прямоходового понижающего преобразователя. Напряжение на выходе (как у импульсного СТАБ).

$$U_{вых} = U_{вх} \cdot K_з = U_{вх} \cdot \frac{t_и}{T}$$



Преимущества прямоходовых преобразователей:
- низкие пульсации;
- большие уровни мощности.

3.7.2. Обратноходовые преобразователи

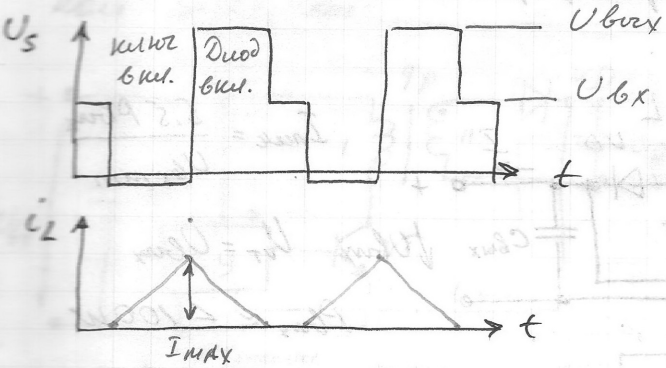


$$i_{L(вкл)} = \frac{U_{вх} \cdot t_{вкл}}{L} \qquad i_{L(выкл)} = \frac{(U_{вых} - U_{вх})\, t_{выкл}}{L}$$

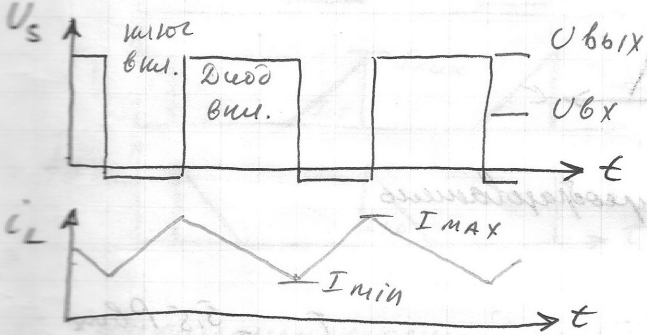
Когда ключ замкнут, создается тоновая петля. Диод обратно смещенный.

Когда ключ размыкается, диод — прямо смещенный пропускает напряжение источника

питания и напряжение индуктивности.



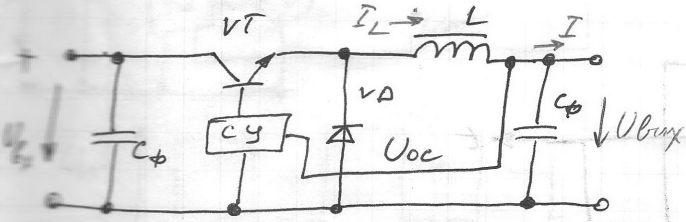
Работа в прерывистом режиме



Работа в непрерывном режиме.

3.7.3. Примеры построения преобразователей.

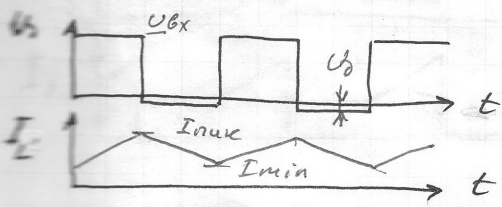
Понижающий преобразователь.



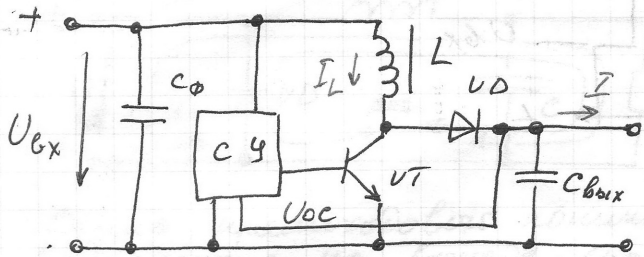
$P_{вых} \approx \leq 1\,kW$

$U_{VT} = U_{вх}$

$I_{пик} = \frac{1{,}4\,P_{вых}}{U_{вх}}$



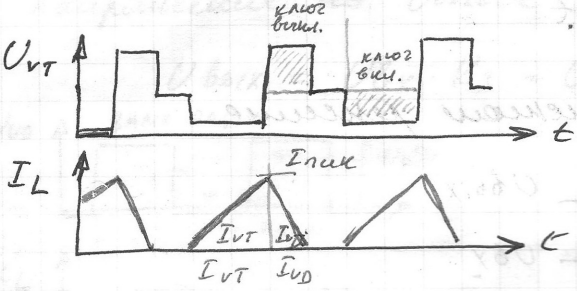
повышающий преобразователь



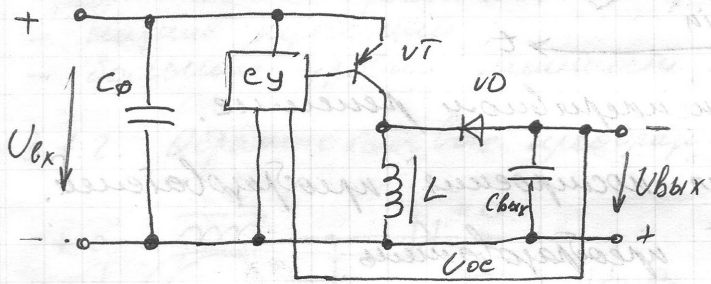
$$I_{имп} = \frac{5.5\,P_{вых}}{U_{вх\,min}}$$

$\downarrow U_{вых}$ $U_T = U_{вых}$

$P_{вых} \approx \leq 100\,Вт$



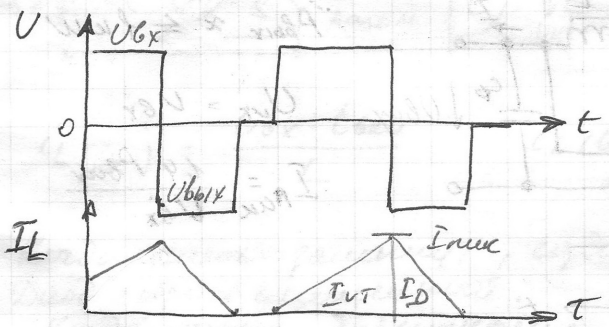
инвертирующий преобразователь



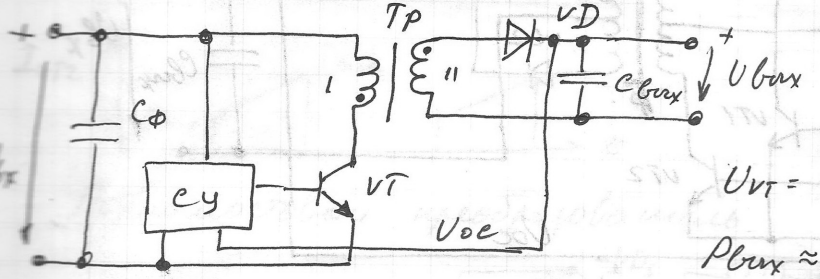
$$I_{имп} = \frac{5.5\,P_{вых}}{U_{вх\,min}}$$

$U_{VT} = U_{вх} + |U_{вых}|$

$P_{вых} \approx \leq 100\,Вт$



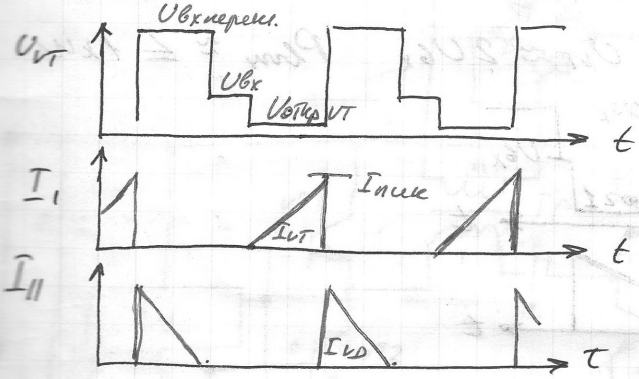
Обратноходовый преобразователь с гальванической развязкой



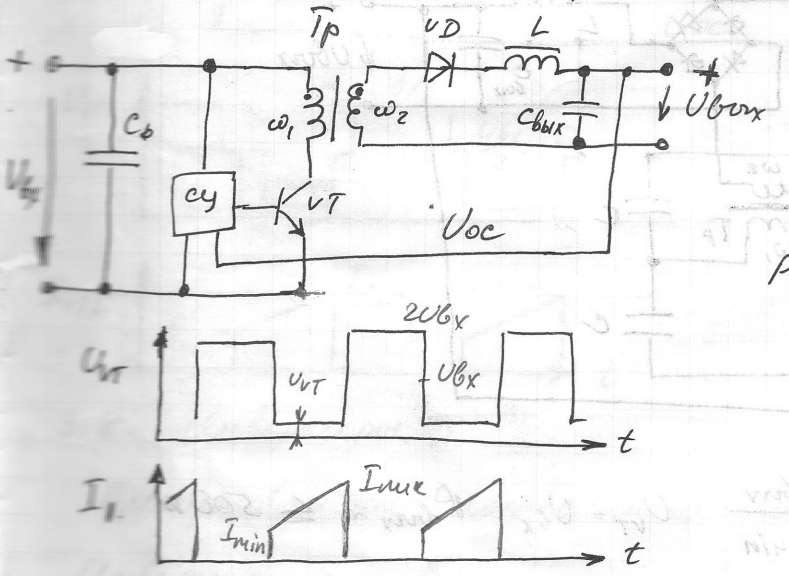
$$I_{имп} = \frac{5{,}5\ P_{вых}}{U_{вх\ min}}$$

$$U_{VT} = U_{вх} + \frac{\omega_1}{\omega_2} U_{вых}$$

$$P_{вых} \approx \leq 150\ Вт$$



Однотранзисторный прямоходовый преобразователь

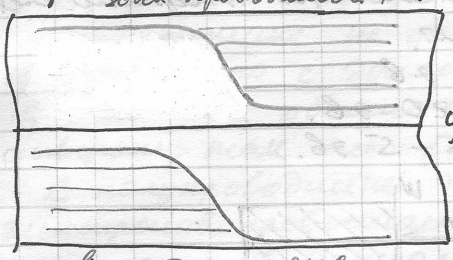


$$I_{имп} = \frac{2{,}8\ P_{вых}}{U_{вх\ min}}$$

$$U_{VT} \approx 2\ U_{вх}$$

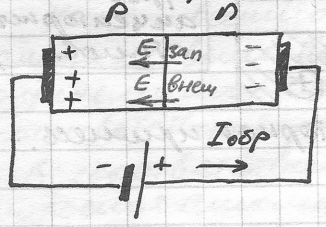
$$P_{вых} = \leq 300\ Вт$$

сопротивлением, т. н. – запирающий слой.

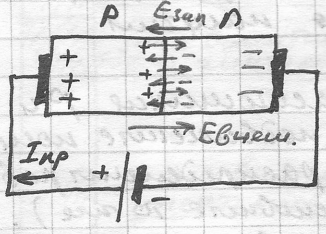


В запирающем слое возникает объемный заряды, что способствует созданию электрического поля с напряженностью E. Это поле так же препятствует переходу дырок из слоя P в слой n и электронов из n в P слой.

Если приложить к p-n переходу внешнее напряжение, вызывающее в запирающем слое электрическое поле $E_{вн}$, совпадающее по направлению с собственным $E_{зап}$, то это приведет к расширению запирающего слоя. В этом случае сопротивление p-n перехода велико, а ток очень мал. Такое направление тока называется обратным.



При противоположной полярности источника питания внешнее электрическое поле направлено навстречу электрическому полю, создаваемому объемными зарядами и полями запирающего поля (вследствие компенсации внешним электрическим полем внутреннего) начинает уменьшаться сопротивление p-n перехода резко снижается и по диоду протекает большой ток. Это направление называется прямым.



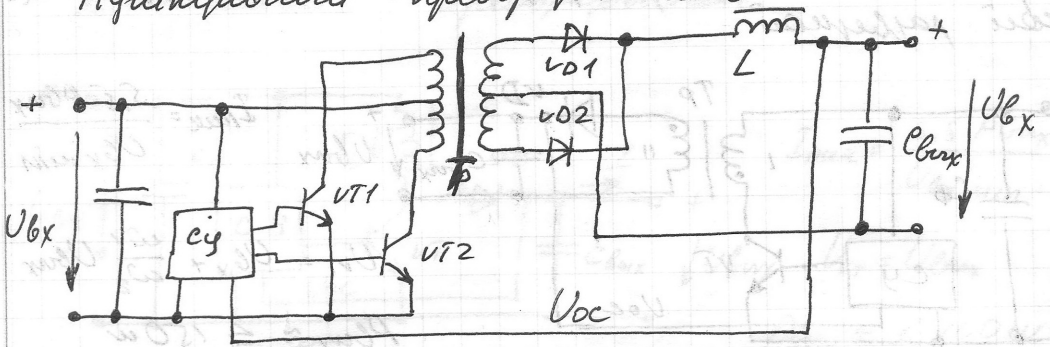
Обозначим через u – напряжение на p-n переходе, а через i – ток перехода. Для идеального p-n перехода зависимость тока от напряжения:

$$i = i_S \cdot \left(e^{\frac{u}{\varphi_T}} - 1\right),$$

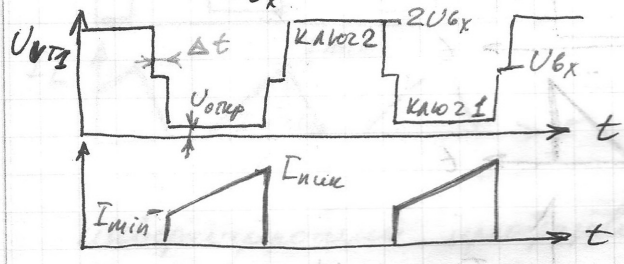
где φ_T – температурный потенциал;

i_S – ток насыщения (тепловой ток) – для кремниевых диодов $i_S = 10^{-15} \ldots 10^{-13}$ А;

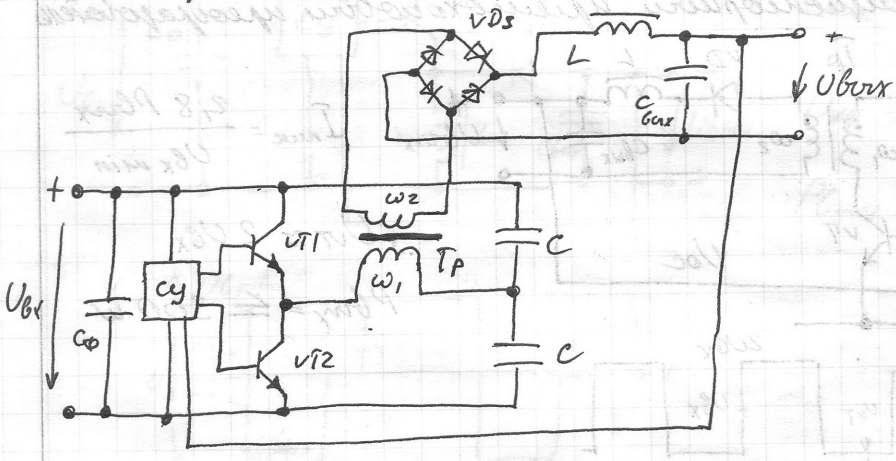
Пушпульный преобразователь



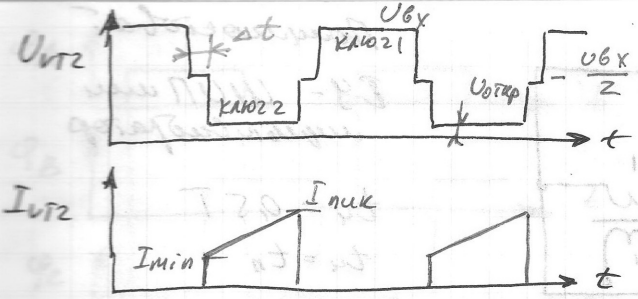
$I_{мин} = \frac{1{,}4\,P_{вых}}{U_{вх}}$ $U_{VT} \approx 2U_{вх}$ $P_{вых} \approx \leq 1$ кВт



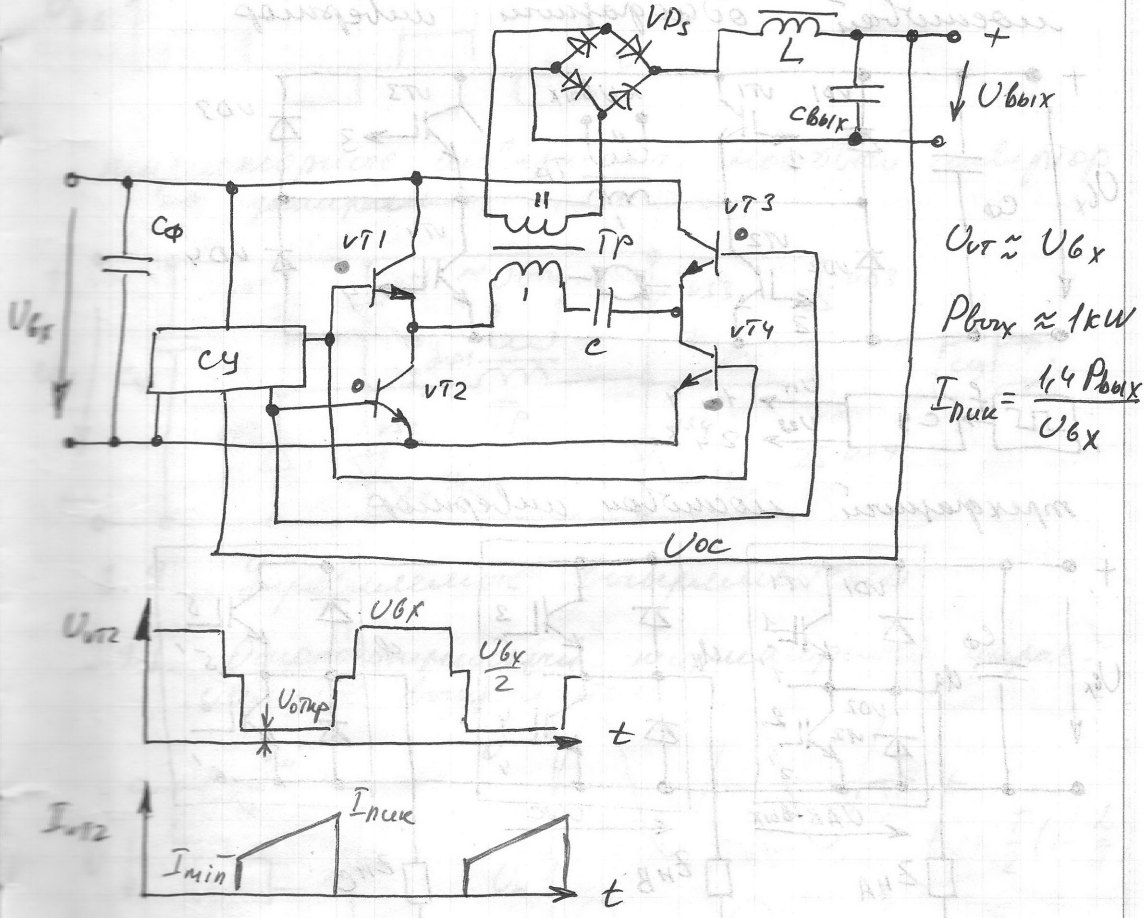
Полумостовой преобразователь



$I_{мин} = \frac{2{,}8\,P_{вых}}{U_{вх\,min}}$ $U_{VT} = U_{вх}$ $P_{вых} \approx \leq 500$ Вт



Полумостовой преобразователь.



$U_{VT} \approx U_{6x}$

$P_{вых} \approx 1кВт$

$I_{пик} = \frac{1,4 P_{вых}}{U_{6x}}$

3.8. Инверторы.

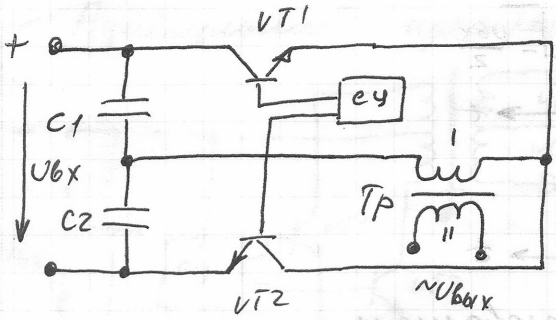
Преобразование постоянного тока в переменный. Инверторы на биполярных транзисторах

Полумостовой

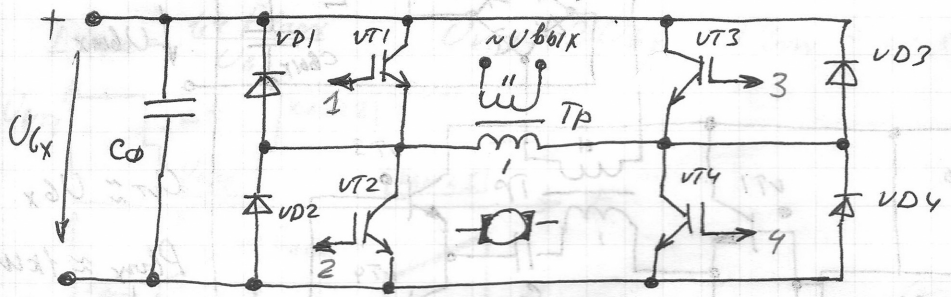
ЧИ - ШИМ или мультивибратор

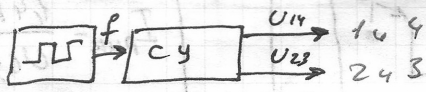
$t_и = 0{,}5\,T$

$t_и = t_п$

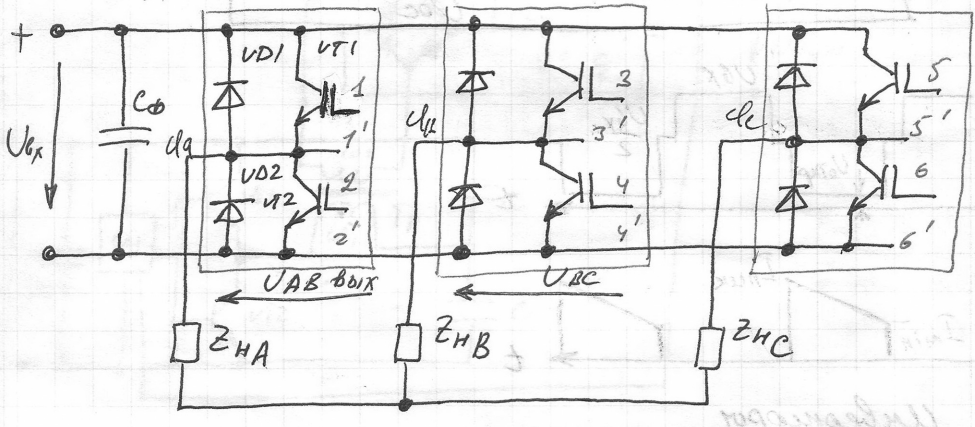


мостовой однофазный инвертор

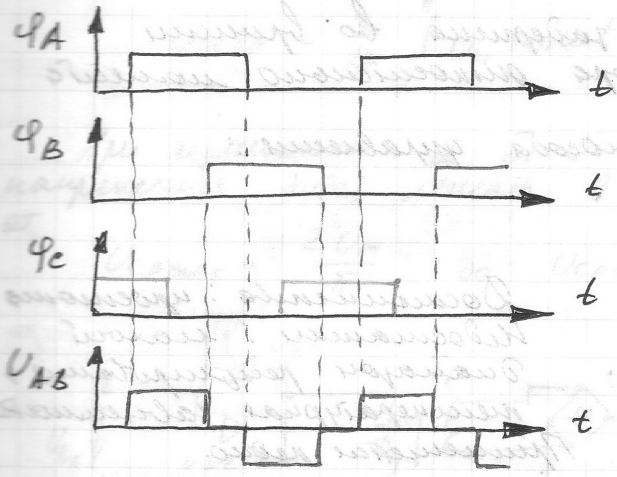




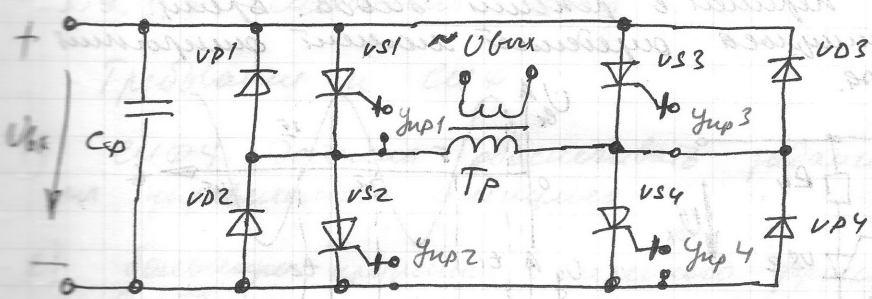
трехфазный мостовой инвертор





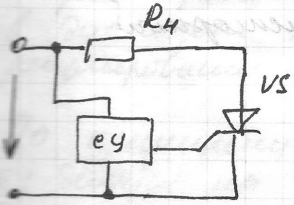


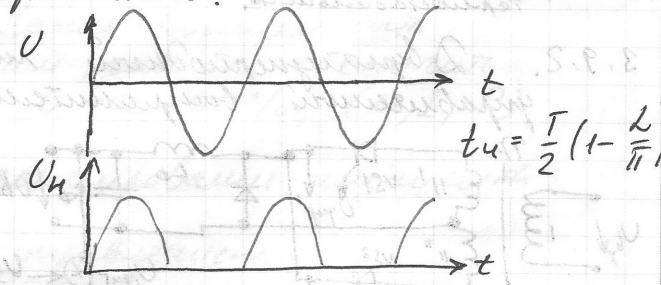
тиристорные инверторы. мостовой инвертор на запираемых тиристорах.



3.9. Управляемые выпрямители.

3.9.1. Однополупериодный тиристорный управляемый выпрямитель.





При наличии сигнала управления на управляющем электроде

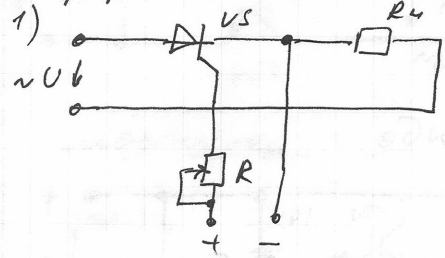
$$U_{н\,ср} = \frac{1}{2\pi}\int_{\alpha}^{\pi} U_{вх}\, d\omega t = \frac{U_м}{2\pi}(1+\cos\alpha)$$

α - угол выпр

Суть управления: задержка во времени включения тиристора относительно момента включения диода.

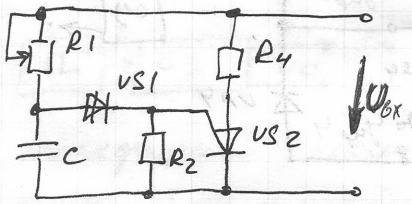
Различают два способа управления:
- амплитудный;
- фазовый.

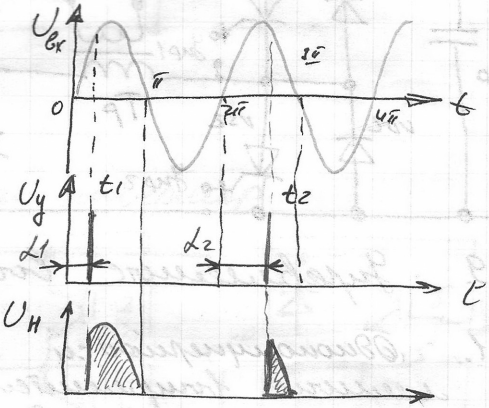
1)



Достоинства: простота
Недостатки: малый диапазон регулирования и температурная зависимость
Применяется редко.

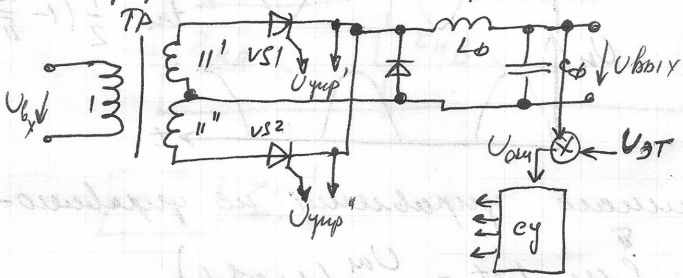
2). Ток через УЭ пропускается импульсами, амплитуда импульса выбирается такой, чтобы тиристор перешел в режим диода. Время подачи импульса определяет момент открытия тиристора.





α – угол открывания тиристора.
Дост-ва: широкий диап. рег-я, термостабильность.

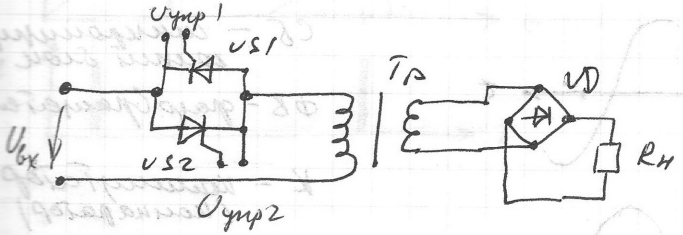
3.9.2. Двухполупериодный тиристорный управляемый выпрямитель.



$$U_{нср} = \frac{2}{2\pi}\int_{\alpha}^{\pi} U_м \sin\omega t\, d\omega t = U_м \frac{(1+\cos\alpha)}{\pi}$$

При изменении α от 0 до π средние значения напряжения будет меняться в пределах от

$U_{срmax} = \frac{2U_м}{\pi}$ до $U_{срmin} = 0$.



3.9.3. Системы СИФУ

Требования к СИФУ:

1) СИФУ должна обеспечивать задание параметров управляющего импульса.

2) большую крутизну переднего фронта (150 ÷ 700 В/эл.град).

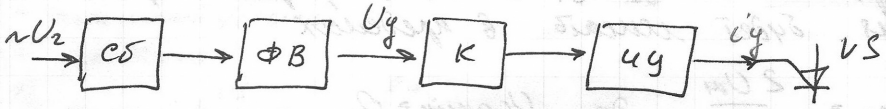
3) синхронизацию каналов в многоканальной системе

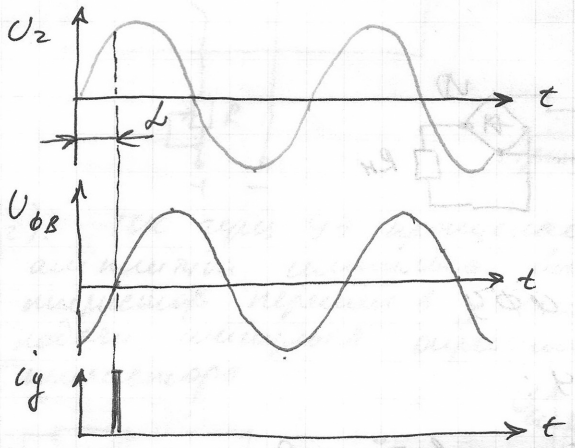
4) угол регулирования должен быть в диапазоне таким, чтобы он обеспечил регулирование от 0 до 100% (U, I, P).

По принципу формирования импульсов СИФУ делятся на
- с горизонтальным управлением;
- с вертикальным управлением;
- с цифровым управлением.

Рассмотрим горизонтальное управление.

Управляющий импульс формируется в момент перехода через 0 синусоидального управляющего напряжения.





СБ – синхронизирующий блок

ФВ – фазовращатель

К – коммутатор (компаратор)

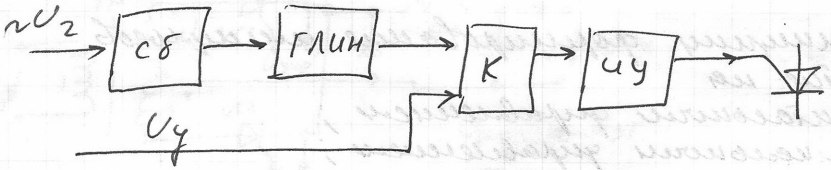
иу – импульсный усилитель

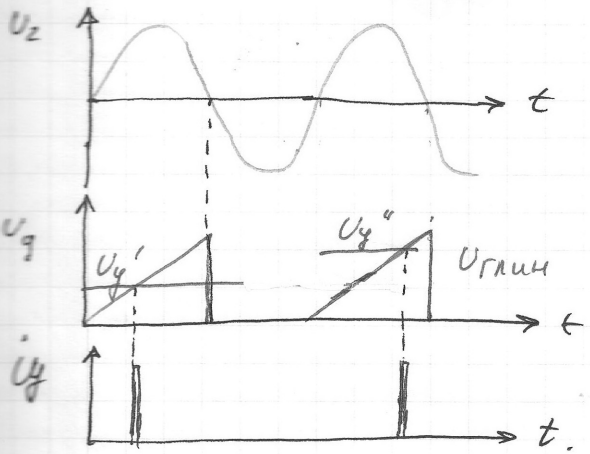
Достоинства: простота

недостатки: - большая инерционность;
- сложность автоматического управления углом α;
- сложность управления в многоканальной системе.

Рассмотрим вертикальное управление

Управляющий импульс формируется в результате равенства линейно изменяющегося напряжения и постоянного напряжения управления.




$U_г$
t
$U_у$
$U_у'$
$U_у''$
$U_{глин}$
t
$U_у$
t.

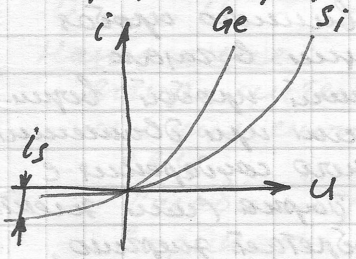
$$\varphi_T = \frac{kT}{q},$$

где k – постоянная Больцмана $k = 8{,}62 \cdot 10^{-5}$ эВ/К = $1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К;

T – абсолютная температура, К;

q – элементарный заряд, $q = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

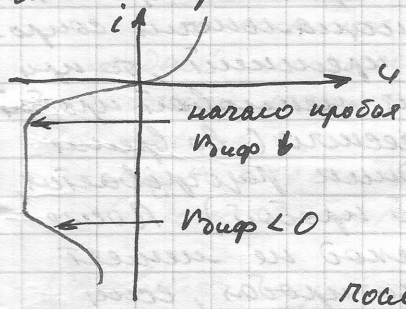
Изобразим график ВАХ диода:



Пробой p-n перехода: пробоем называют резкое изменение режима работы перехода, находящегося под обратным напряжением. Характерной особенностью этого изменения является резкое уменьшение дифференциального сопротивления перехода – $r_{диф}$:

$$r_{диф} = \frac{du}{di}$$

После начала пробоя незначительное увеличение обратного напряжения сопровождается резким увеличением обратного тока.



В основе пробоя p-n перехода лежат 3 физических явления:

- туннельного пробоя (эффект, явление Зенера);
- лавинного пробоя;
- теплового пробоя.

Последние два принято называть электрическим пробоем. Рассмотрим подробнее.

Туннельный пробой. Его называют зенеровским.

Изобразим зонную диаграмму p-n перехода. Если геометрическое расстояние между валентной зоной и зоной проводимости (толщина барьера) достаточно мало, то возникает туннельный эф-