

Министерство образования и науки Украины
Севастопольский национальный технический университет

Методические указания

к курсовой работе по дисциплине

«Аналоговая схемотехника»

для студентов дневной и заочной формы обучения
специальностей 7.090801 и 7.090804

Севастополь
2005

УДК681.3
Цифровая схемотехника

/ В.О. Васин. Учебное пособие. – Севастополь: СевНТУ, 2005. – 79с.

Целью учебного пособия является оказание помощи студентам в подготовке к выполнению курсовой работы по дисциплине «Аналоговая схемотехника».

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению «Электроника».

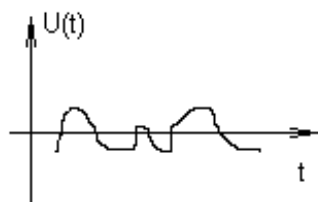
Учебное пособие рассмотрено и утверждено на заседании кафедры электронной техники (протокол № 1 от 25 августа 2005 г.)

Рецензент Тестоедов А.А. канд. тех. наук, доцент кафедры ЭЛТ.

АСТ – изучает принципы правила и технику конструирования аналоговых схем.

Аналоговые схемы – схемы, которые обрабатывают аналоговые сигналы.

Аналоговый сигнал – физическая величина, производная которой существует и однозначно определена в любой момент времени, в которые этот сигнал существует.



Важен каждый момент в аналоговой схемотехнике.

Проще говоря аналоговый сигнал – физическая величина, которая может принимать любые значения в заданном промежутке амплитуд.

АСТ имеет ряд достоинств:

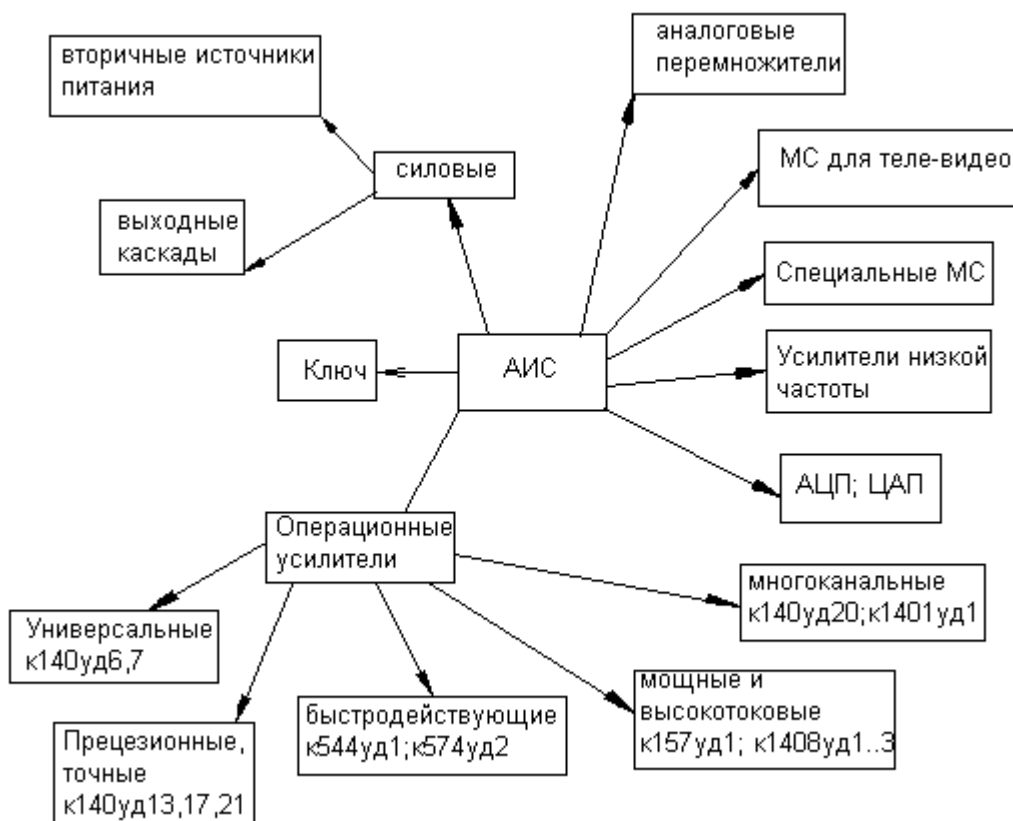
- возможность задания любого произвольного номинала параметров (ток, напряжение, сопротивление, частота, форма сигнала).
- возможность обработки сигнала произвольной формы.
- конструкционная избыточность.

Недостатки:

- частое использование большого количества навесных элементов (дополнительных резисторов, конденсаторов, диодов).
- невозможность создания общего стандарта аналоговых ИС (АИС).
- необходимость индивидуального подхода к каждой микросхеме (МХ) в процессе производства и разработки.
- необходимость использования нескольких источников питания.
- большое количество параметров, которые необходимо учитывать для правильной разработки и эксплуатации МС.

Задачи развития АСТ:

1. увеличение функциональной сложности.
2. увеличение надежности.
3. увеличение точности преобразования.
4. увеличение повторяемости схем, чтобы разброс параметров был мал.
5. уменьшение весогабаритных показателей и потребляемой мощности.



$I = \frac{U}{R}$ - интегральный закон Ома. (справедлив для схем, где нет нелинейных элементов).

$i(t) = \frac{u(t)}{r}$ - дифференциальный закон Ома. (для элементов для определения времени).

$P = I * U$ - мощность. [Вт=Дж/с].

I : от 10^{-10} до 10^{16} А – измеряемые токи

U: от 10^{-9} до 10^6 В.

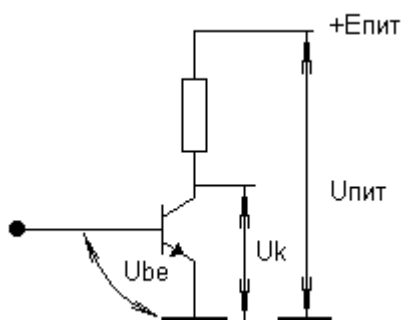
R : от 10^{-2} до 10^{10} Ом.

Приставки:

10^{-12} – пико; 10^{-9} – нано; 10^{-6} – микро; 10^{-3} – милли; 10^3 – кило; 10^6 – мега; 10^9 – гига.

Ток- поток заряженных частиц. Направление электрического тока совпадает с направлением движения положительных частиц. Ток всегда меряется в разрыве цепи:

Напряжение меряется между чем-то и чем-то:

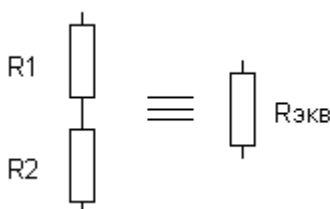


Сопротивления:

- измеряется омметром;
- коэффициент пропорциональности между током и напряжением.

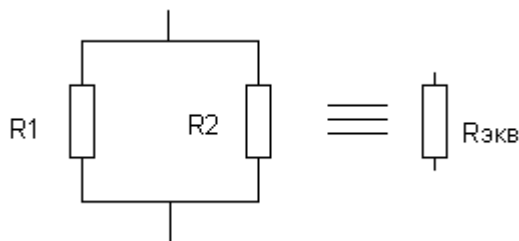
Параллельное, последовательное соединение резисторов.

Последовательное:



$$R_{\text{экв}} = R_1 + R_2$$

Параллельное:



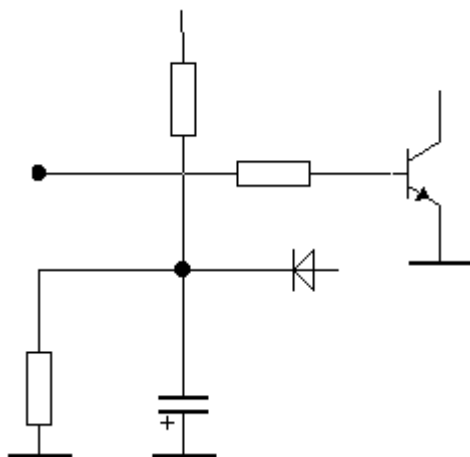
$$\frac{1}{R_{\text{экв}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad R_{\text{экв}} = \frac{R_1 * R_2}{R_1 + R_2}$$

Первый закон Кирхгофа: сумма токов, втекающих в точку схемы (узел), равна сумме вытекающих из него.

$$i_1 = i_2 + i_3$$

Следствие: в замкнутой цепи ток одинаков во всех точках схем.

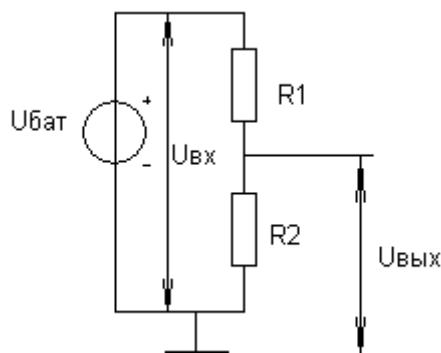
Второй закон Кирхгофа: сумма падений напряжений в любом замкнутом контуре равна "0". (Напряжение одинаково на всех параллельно соединенных между собой элементах схемы).



Резисторы – электронный прибор с нормируемым сопротивлением и рассеиваемой мощностью (нормируется мощность постоянная).

Делитель напряжения.

Задача: какое напряжение на R_2 .



Нужно определить ток:

$$U_{вх} = I(R_1 + R_2); U_{вых} = I * R_2 = \frac{U_{вх} * R_2}{R_1 + R_2}$$

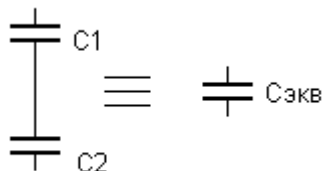
Конденсаторы.

Это электронный прибор с нормируемой ёмкостью и пробивным напряжением.

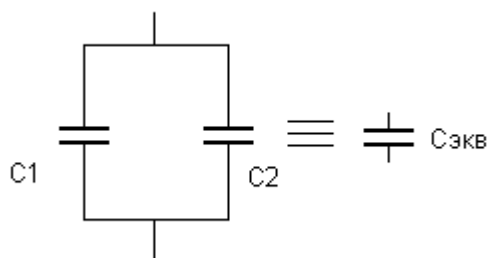
$I_c = C * \frac{dU(t)}{dt}$ - ток, через конденсатор подчиняется этому закону.

Если напряжение на конденсаторе, имеющем емкость 1 Ф изменится на 1 В за 1 с, то говорят, что через конденсатор протекает ток в 1 А.

Параллельное и последовательное соединение конденсаторов.



$$\frac{1}{C_{экв}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}; C_{экв} = \frac{C_1 * C_2}{C_1 + C_2}$$

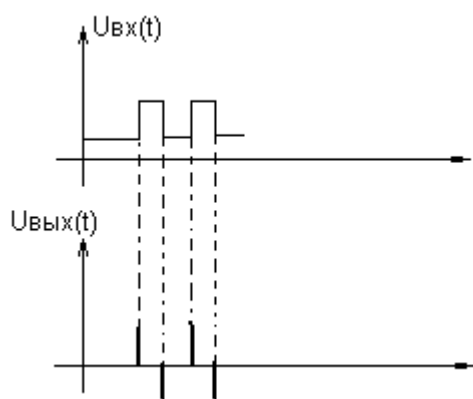


$$C_{\text{экв}} = C_1 + C_2$$

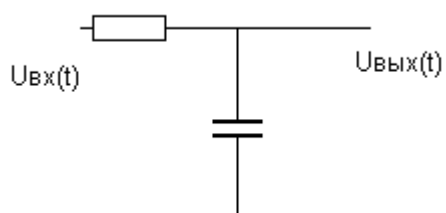
Дифференцирующая цепь.

$$U_{\text{вых}}(t) = RC \frac{dU_{\text{вх}}(t)}{dt}$$

Если на вход схемы подать сигнал:

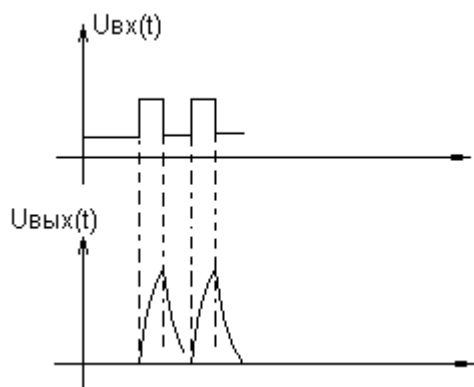


Интегрирующая цепь.



$$U_{\text{вых}}(t) = \frac{1}{RC} \int_0^t U_{\text{вх}} dt + \text{const}$$

на вход подаем сигнал:



Источник тока:

Идеальный источник тока – некоторая схема имеющая два вывода и поддерживающая постоянный ток во внешней цепи вне зависимости от сопротивления нагрузки.

Идеальных источников тока не существует.

Реальный генератор тока имеет внутреннее сопротивление:

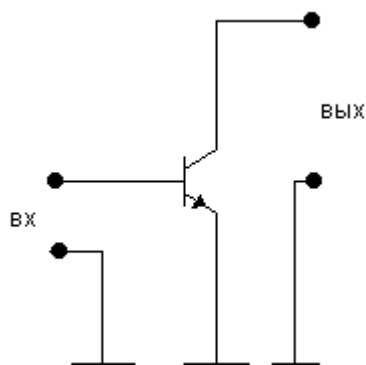
Генератор напряжения:

Идеальный источник напряжения – некоторая схема, имеющая два выхода и поддерживающая постоянное напряжение вне зависимости от сопротивления нагрузки или от потребляемого внешнего тока.

(батареяка электропитания).

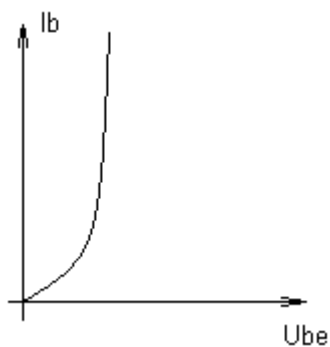
Методы задания рабочей точки транзистора.

Четырехполюсник.

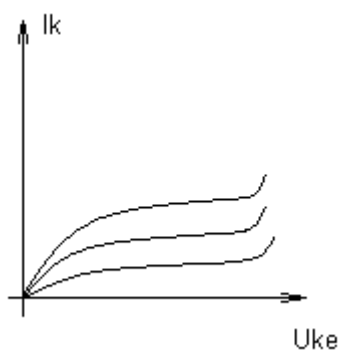


Если подойти к транзистору, как к четырехполюснику, можно составить ряд характеристик.

Входная характеристика.



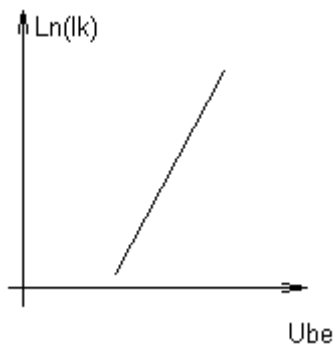
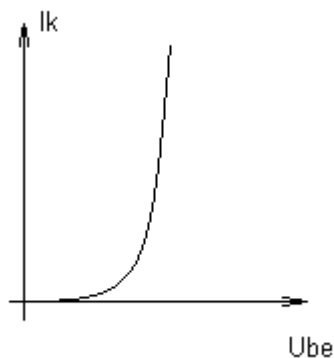
Выходная характеристика.



Проходная характеристика.

Ток коллектора – выходная характеристика.

Выходная характеристика – U_{be} .



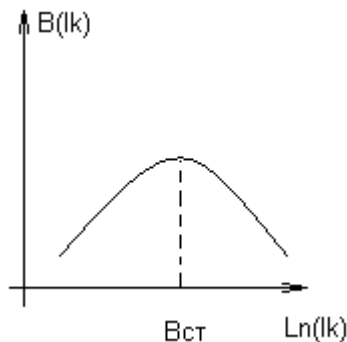
$$I_k = I_{kk0} * \exp\left(\frac{U_{be}}{m\varphi_T} - 1\right) - \text{описывает поведение тока коллектора.}$$

$\varphi_T = 0,026 \text{ В}$ – тепловой потенциал.

m – коэффициент уровня сигнала.

$m=1$ для малого сигнала.

Коэффициент усиления – функция тока коллектора. $B = \frac{I_k}{I_b} = h_{21}$.



Динамический коэффициент усиления:

$$\beta = \frac{dI_k}{dI_b}$$

Проходная характеристика.

Нужно задать 2 параметра (чтобы получить рабочую точку для транзистора).

Дифференциальное сопротивление:

$$R_g = \frac{\Delta U_{be}}{\Delta I_k}$$

$$\beta = \frac{dI_k}{dI_b} = \frac{d(B * I_b)}{dI_b} = \frac{I_b dB}{dI_b} + \frac{B dI_b}{dI_b} = \frac{I_b dB}{dI_b} * \frac{dI_k}{dI_k} + B = I_b * \beta \frac{dB}{dI_k} + B$$

$$\beta = \frac{B}{1 - \frac{I_k dB}{B dI_k}}$$

β ведет себя по другому, чем B . Если I_k увеличивается, то знаменатель меньше 1.

$I_k \uparrow$, то $\beta < B$

$I_k \downarrow$, то $\beta > B$.

Динамический коэффициент усиления отличается от статического в зависимости от поведения тока коллектора.

Транзистор - токовый прибор.

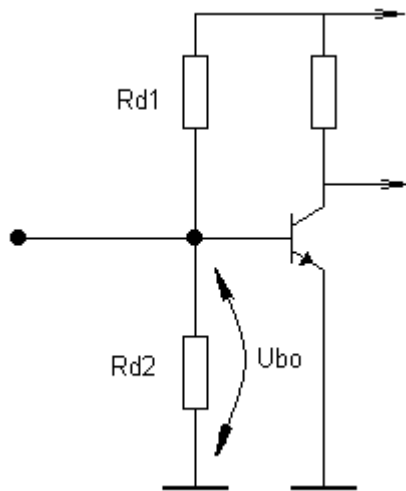
$$I_k = I_{k0} * \exp\left(\frac{U_{be}}{\varphi_T}\right)$$

при изменении U_{be} , $I_k \sim \exp$. (ток меняется в широких пределах)

Если задаем I_b , то $I_k = B * I_b$ - линейная функция. Следовательно, транзистор – токовый прибор и рабочая точка задается через I_b .

$$I_e = I_b + I_k \quad I_e = I_b + I_k = I_b + B * I_b = I_b * (B + 1)$$

$$I_e = I_b * (B + 1) \quad I_k = B * I_b = \frac{B}{B + 1} * I_e$$



$$I_k = I_{kk0} * \exp\left(\frac{U_{be}}{\varphi_T}\right)$$

α - температурный коэффициент вносит добавку в U_{be} в зависимости от температуры перехода окружающей среды.

$$\alpha = 2,1 \text{ мВ/К}$$

$$U_{be} = U_{be0} - \alpha * \Delta T$$

За счет температуры появляется дополнительное падение на переходе.

Если $\Delta T = 30\text{K}$, то $U_{be} = U_{be0} + 2 * 30 = U_{be0} + 60\text{мВ}$, т.е. U_{be} изменится на 60 мВ.

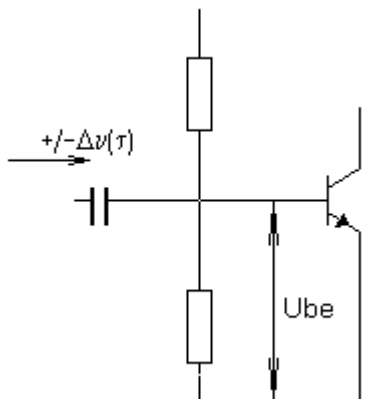
$$I_k = I_{kk0} * \exp\left(\frac{U_{be} + \Delta U_{be}}{\varphi_T}\right) = I_{kk0} * \exp\left(\frac{U_{be}}{\varphi_T}\right) * \exp\left(\frac{\Delta U_{be}}{\varphi_T}\right)$$

При $T \uparrow$ на 30 градусов I_{kk0} (ток коллектора покоя) увеличивается в 10 раз.

Задание рабочей точки транзистора с помощью напряжения U_{be} (делителя напряжения) не очень удачно с точки зрения температурной стабилизации усилительного каскада.

$$I_k = I_{kk0} * \exp\left(\frac{U_{be}}{\varphi_T}\right)$$

Разберем в режиме малого сигнала:



$$I_k = I_{k0} * \exp\left(\frac{U_{be} \pm \Delta U(t)}{\varphi_T}\right) = I_{k0} * \exp\left(\frac{U_{be}}{\varphi_T}\right) * \exp\left(\frac{\pm \Delta U(t)}{\varphi_T}\right) = I_{k0} * \exp\left(\frac{\pm \Delta U(t)}{\varphi_T}\right)$$

exp – линейна, если ее показатель в диапазоне $\pm 0,1$.

Рассмотрим показатель экспоненты $\left(\frac{\pm \Delta U(t)}{\varphi_T}\right)$:

Условия малого сигнала:

$$\left(\frac{\pm \Delta U(t)}{\varphi_T}\right) = \pm 0,1$$

$$\pm \Delta U(t) = \pm 0,1 * \varphi_T$$

на сколько соблюдается линейность на этом сигнале:

$$I_k^+(t) = I_{k0} * \exp(0,1) \quad I_k^-(t) = I_{k0} * \exp(-0,1)$$

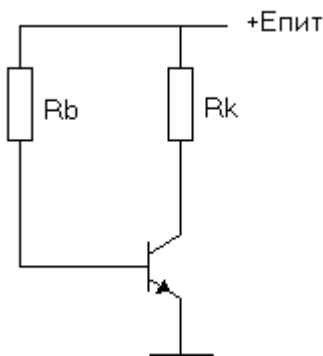
$$\frac{I_k^+(t)}{I_{k0}} = 1,105 \quad \frac{I_k^-(t)}{I_{k0}} = 0,905$$

Даже при малом приращении нелинейность равна 10%.

Транзистор при любом усилении искажает сигнал.

В режиме малого сигнала подразумевается, что входной сигнал не превышает $\pm 0,1 * \varphi_T$.

Задание рабочей точки транзистора током базы.



$$E_{num} = U_{kb} + U_{be} = U_{rb} + (U_{be} - \alpha * \Delta T)$$

$$I_b = \frac{U_{rb}}{R_b}; \quad U_{rb} = E_{num} - U_{be0} + \alpha * \Delta T$$

$$I_b = \frac{U_{rb}}{R_b} = \frac{E_{num} - U_{be} + \alpha * \Delta T}{R_b} = \frac{E_{num} - U_{be}}{R_b} + \frac{\alpha * \Delta T}{R_b}$$

Влияние α ослаблено в R_b раз. Возьмем $\alpha = -2,1$ мВ/К и размах температуры: $\Delta T = \pm 100\text{K} = 200$.

Предположим $R_b = 10$ КОм, тогда

$$\frac{\alpha * \Delta T}{R_b} = \frac{-2,1 * 200}{10^4} = -4 * 10^{-2} = -4\%$$

С точки зрения стабилизации задание рабочей точки транзистора током базы – более стабильно (не так зависит от α).

Коэффициент усиления не постоянная величина, а функция от тока, от температуры; идеальная схема имеет свои недостатки.

Недостатки:

- зависимость коэффициента усиления от температуры и от тока.

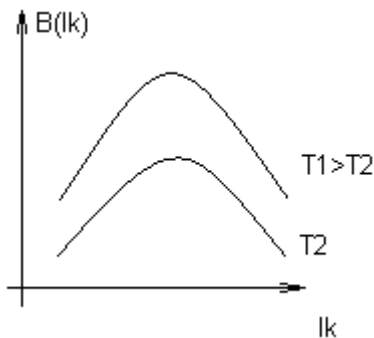
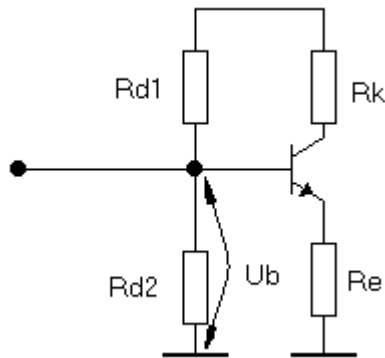


Схема усилителя с резистором отрицательной обратной связи в эмиттере.



$$U_b = \frac{E_n * R_2}{R_1 + R_2} = U_{be} + U_{re}$$

$$U_{re} = \frac{E_n * R_2}{R_1 + R_2} - U_{be} \quad U_{be} = U_{be0} - \alpha * \Delta T$$

$$I_e = \frac{U_{re}}{R_e} = \frac{E_n * R_2}{R_2 * (R_1 + R_2)} - \frac{U_{be0}}{R_e} + \frac{\alpha * \Delta T}{R_e}$$

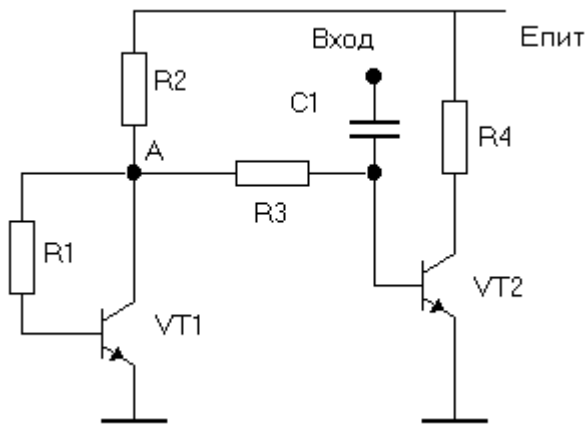
Зависимость $\alpha * \Delta T$ —ослабляется в R_e раз. Эта схема менее термостабильна, чем предыдущая, так как R_e — не может быть может большим (если большое R_e , то оно будет влиять на I_k).

Температурная стабильность этой схемы, лучше чем первой схемы.

Схема с высокой термостабильностью.

Предполагает использование согласованных транзисторов, находящихся в одинаковых температурных условиях (рядом).

Согласованные транзисторы — их параметры очень близки.



Напряжение в точке А:

$$U_A = U_{R1} + U_{be1}$$

$$U_A = U_{R3} + U_{be2}; \quad U_{R3} = U_A - U_{be2}$$

$$I_{b2} = \frac{U_{R3}}{R_3} = \frac{U_A - U_{be2}}{R_3} = \frac{U_{R1} + U_{be1} - U_{be2}}{R_3} = \frac{U_{R1} + U_{be01} - \alpha * \Delta T - U_{be02} + \alpha * \Delta T}{R_3} =$$

$$= \frac{U_{R1} + U_{be01} - U_{be02}}{R_3}$$

Если транзисторы находятся в одинаковых условиях, то есть $\Delta T_1 = \Delta T_2$ и базовый ток второго транзистора практически не зависит от температуры – это стандартный подход для конструирования операционных усилителей.

Крутизна – S.

Различают:

- крутизну транзистора;
- крутизну схемы (усилительной).

$$S = \frac{dI_{вых}}{dU_{вх}}$$

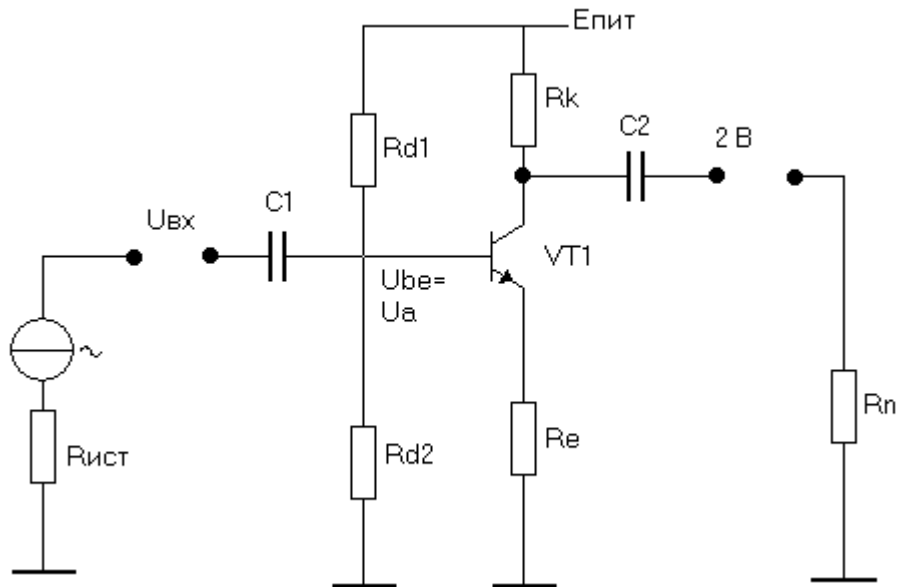
для транзистора: $S = \frac{dI_k}{dU_{be}},$

чем круче характеристика, тем выше крутизна.

$$S = \frac{dI_k}{dU_{be}} = [I_k = I_{k0} * \exp(\frac{U_{be}}{m * \varphi_T})] = \frac{U_{be}}{dU_{be}} * \frac{1}{m * \varphi_T} * I_{k0} * \exp(\frac{U_{be}}{m * \varphi_T}) = \frac{I_k}{m * \varphi_T}$$

справедливо в зоне действия малого сигнала.

Расчет усилительного каскада на биполярном транзисторе.



Задание: рассчитать усилитель низкой частоты с полосой рабочих частот от 20 Гц до 20 КГц, работающий от напряжения питания 20 В на сопротивление нагрузки 20 КОм, имеющем входной сигнал 50 мВ и усиливающий до 2 В, то есть:

$E_{\text{п}}=20\text{В}; R_{\text{н}}=20\text{КОм}$; полоса частот 20 – 20000 Гц; $U_{\text{вх}}=50\text{ мВ}$; $U_{\text{вых}}=2\text{ В}$.

Коэффициент усиления:

$$K_u = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{2}{50 \cdot 10^{-3}} = 40$$

$$I_{\text{н}} = \frac{U_{\text{вых}}}{R_{\text{н}}} = \frac{2}{2 \cdot 10^4} = 0,1\text{мА}$$

$I_{\text{к}} \gg I_{\text{н}}$ в 10 раз, чтобы нагрузка не вносила разбалансировку схему.

Пусть $I_{\text{к}}=1\text{ мА}$, чтобы транзистор не сгорел.

$$K_u = \frac{dU_{\text{вых}}}{dU_{\text{вх}}} \text{ - моментальный коэффициент усиления.}$$

При входном сигнале:

$$U_b = U_{b0} + \Delta U_{\text{вх}} \quad \Delta U_{\text{вх}} \text{ - приращение за счет входного сигнала.}$$

$$U_{\text{re}} = U_{\text{re0}} + \Delta U_{\text{вх}}; \quad \Delta U_{\text{вх}} = \Delta U_e$$

к току появляется тоже добавка:

$$\Delta i_e = \frac{\Delta U_e}{R_e + r_e}$$

у эмиттера есть своё сопротивление (оно подключено последовательно) и равно r_e .

На выходе тоже появляется добавка:

$$\Delta U_{\text{вых}} = \Delta U_{\text{rk}} = \Delta i_e * R_k = \frac{\Delta U_e}{R_e + r_e} * R_k = \frac{\Delta U_{\text{вх}}}{R_e + r_e} * R_k$$

В данной схеме коэффициент усиления по напряжению равен отношению сопротивлений R_k к последовательному соединению R_e и r_e . Чтобы получить максимальный диапазон усиления напряжение на выходе равно:

$$U_{k0} = \frac{20}{2} = 10 \text{ В}$$

$$R_k = \frac{U_{k0}}{I_k} = \frac{10 \text{ В}}{1 \text{ мА}} = 10 \text{ КОм}$$

Рассчитанные параметры:

$R_k = 10 \text{ КОм}$; $R_e = 240 \text{ Ом}$; $R_2 = 10 \text{ КОм}$; $R_1 = 190 \text{ КОм}$

$C_1 = 50 \text{ мкф} - 6,3 \text{ В}$; $C_2 = 5 \text{ мкф} - 30 \text{ В}$.

r_e – справочные данные для каждого транзистора. $R_e = 25 \text{ Ом}$.

$$\text{Рассмотрим: } R_e = \frac{R_k}{K_u} - r_e = \frac{10^4}{40} - 25 = 225 \text{ Ом.}$$

Температурная зависимость ослабевает, а коэффициент усиления сохраняется.

Система отключена от входа:

$$U_{b0} = U_{be} + U_{re}$$

$$U_{be} \approx 0,76 \text{ В (для Si).}$$

$$U_{re} = I_e * R_e \approx I_k * R_e \approx 240 * 10^{-3} = 0,24 \text{ В}$$

$$U_{b0} = 0,76 + 0,24 = 1 \text{ В}$$

$$\frac{R_{d1}}{R_{d2}} = \frac{20}{1}$$

$$I_{b0} = \frac{10^{-3}}{10^2} = 10^{-5} \text{ А} = 10 \text{ мкА}$$

Суммарное сопротивление делителя равно I_d в 10 раз больше, чем I_{b0} .

$$I_d = 10 * I_{b0} = 10 * 10 \text{ мкА} = 100 \text{ мкА};$$

$$R_d = \frac{20 \text{ В}}{10^{-4} \text{ А}} = 2 * 10^5 \text{ Ом}$$

$$R_1 + R_2 = 200 \text{ КОм}$$

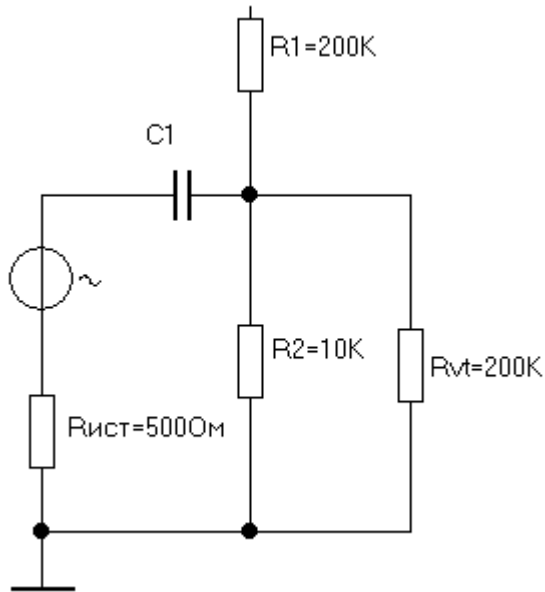
$$\frac{R_1}{R_2} = 20; R_1 = 20 * R_2$$

$$20 * R_2 + R_2 = 200 \text{ КОм}$$

$$R_2 = \frac{200 \text{ КОм}}{21} = 9,5 \text{ КОм} \approx 10 \text{ КОм}$$

$$R_1 = 200 \text{ КОм} - 10 \text{ КОм} = 190 \text{ КОм} \approx 200 \text{ КОм}$$

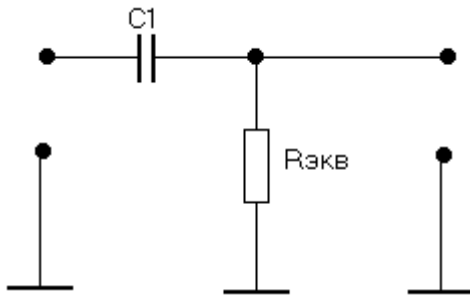
$$R_{\text{эк}} = R_{\text{иис}} \parallel R_2 \parallel R_1 \parallel R_{vt}$$



При параллельном соединении общее сопротивление равно или меньше меньшего. Учитываем маленькое сопротивление.

$$R_{\text{эк}} = R_{\text{ист}} \parallel R_2 = \frac{500 * 10000}{10500} = 470 \text{ Ом}$$

Входной конденсатор:



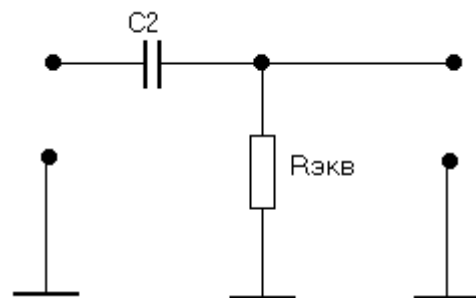
$$X_C = -j \frac{1}{\omega * C} \text{ - активное сопротивление конденсатора.}$$

Емкость конденсатора, если $R_C = R_{\text{экв}}$

$$R_{\text{эк}} = \frac{1}{\omega * C}; C = \frac{1}{2 * \pi * f * R_{\text{эк}}} = \frac{1}{6,28 * 20 \text{ Гц} * R_{\text{эк}}} = 16 \text{ мкф}$$

Увеличиваем C в 3 раза, то есть $C_1 = 50 \text{ мкф} - 6,3 \text{ В.}$

Выходной конденсатор:



$$R_{\text{эк}} = R_k \parallel R_n$$

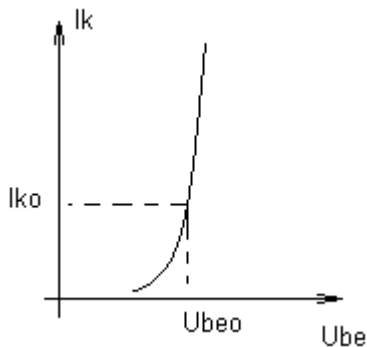
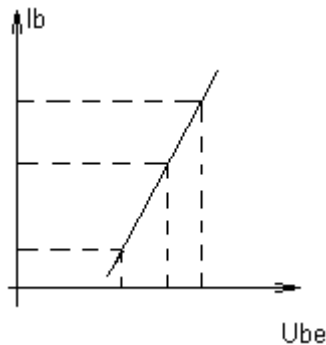
$$C_2 = \frac{1}{\omega * R_{эк2}} = \frac{1}{6,28 * 20 * 6,7 * 10^3} = 1,2 \text{ мкф}$$
 из условия деления пополам

$C_2 = 5 \text{ мкф} - 30 \text{ В.}$

Выбор значения U_{be} .

При расчете мы принимаем:

$U_{be} = 0,7 \text{ В.}$ Для определения U_{be} для данного типа транзистора необходимо воспользоваться данными из справочника.



Семейство выходных характеристик.

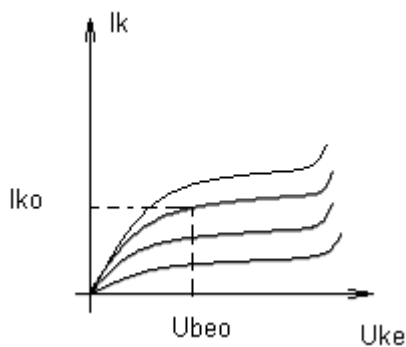
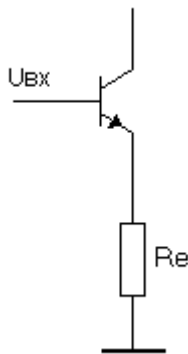


Схема с ОК. Эмиттерный повторитель.

В данном включении схема не усиливает по напряжению, а усиливает по мощности. Основное предназначение схемы – согласование предыдущего каскада (входного) с выходным каскадом.



$U_{vx} > U_{be}$ - транзистор войдет в рабочий режим.

$U_{vx} > 0,6B$ - транзистор в активном режиме.

$U_{vx} = U_{be} + U_{re}$

$$\Delta U_{vx} = \Delta U_{re}; I_b = \frac{I_e}{1 + h_{21e}}; \Delta I_b = \frac{\Delta I_e}{1 + h_{21e}} = [\Delta I_e = \frac{\Delta U_{re}}{R_e}; \Delta U_e = \Delta U_b] = \frac{\Delta U_b}{R_e * (h_{21e} + 1)}$$

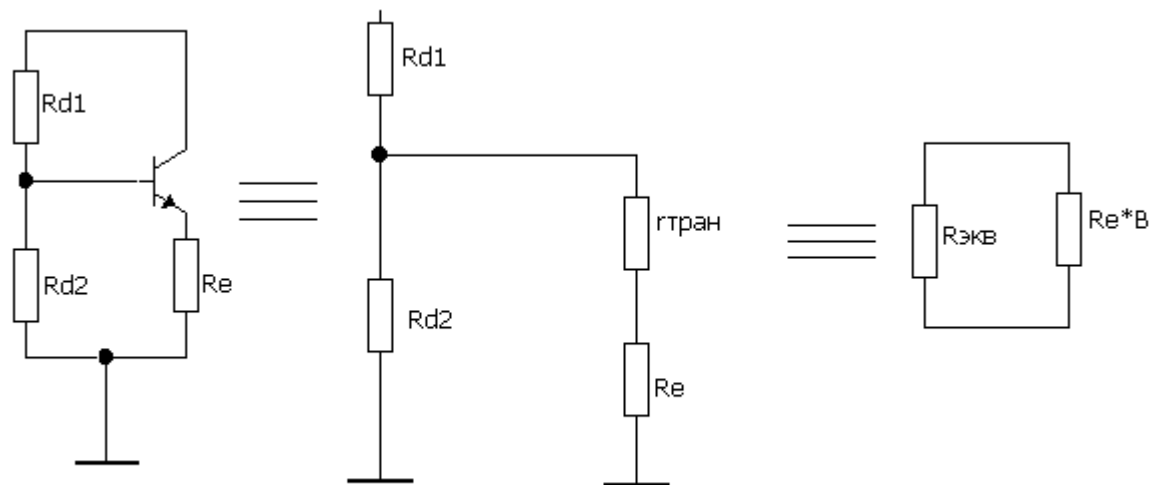
$$R_{vx} = \frac{\Delta U_b}{\Delta I_b}; R_{vx} = \frac{\Delta U_b}{\Delta U_b} * R_e * (h_{21e} + 1) = R_e * (h_{21e} + 1) \approx R_e * h_{21e}$$

R_{vx} – зависит от R_e и h_{21e} – коэффициента усиления.

R_{vx} схемы на переменном сигнале будет в h_{21e} раз больше, чем R_e .

$Z_{vx} = Z_n * B$; $R_{vx} = B * R_e$

Данная схема преобразует невысокое Z_n , в h_{21e} увеличивая его.



$$R_{эк} = R_{d1} \parallel R_{d2}$$

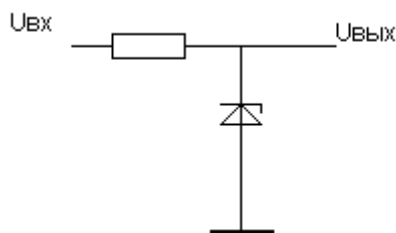
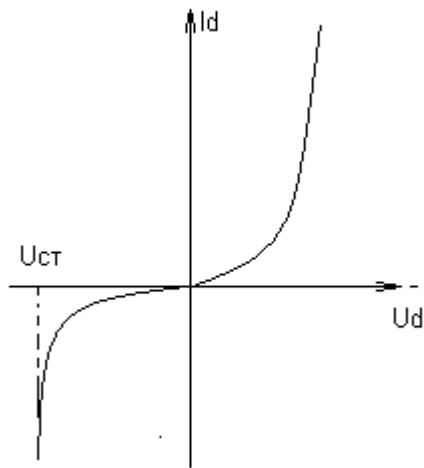
по постоянному току критерии выбора следующие:

$$R_{эк} \ll R_e * B \approx 100000 \text{ Ом}$$

$$R_{эк} = \frac{R_e * B}{10} = 10 \text{ КОм}$$

Параллельное соединение резисторов, составляющих делитель равно $\frac{R_e * B}{10}$.

Использование эмитерного повторителя в стабилизаторе напряжения.



$$\frac{U_{vx} - U_{vyx}}{R} > I_{vyx}$$

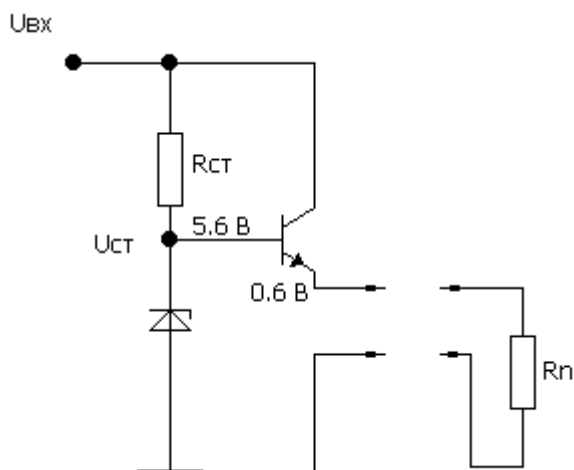
$$\frac{U_{vx} - U_{vyx}}{R} < I_{cm. \max}$$

для КС156А (по справочнику)

$I_{ст} = 3 \dots 55 \text{ мА}$.

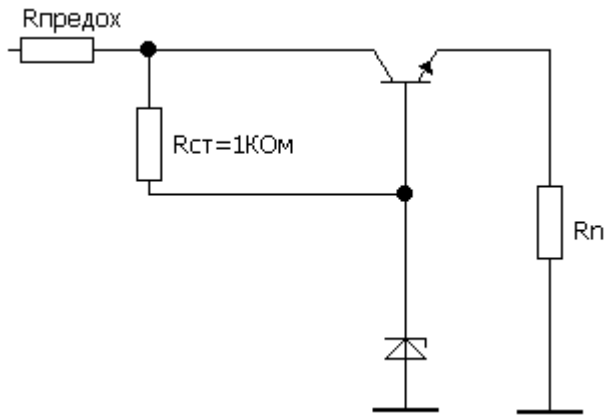
Присоединим к схеме эмитерный повторитель.

$U_{cm} = U_n + U_{be}$; $U_{be} = \text{const} = 0,6 \text{ В}$

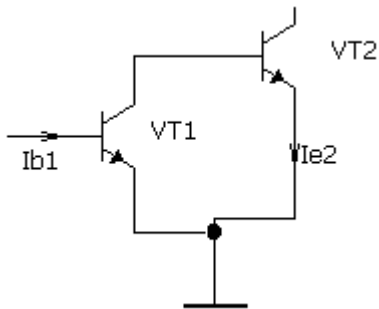


Классическая схема стабилитрона напряжения.

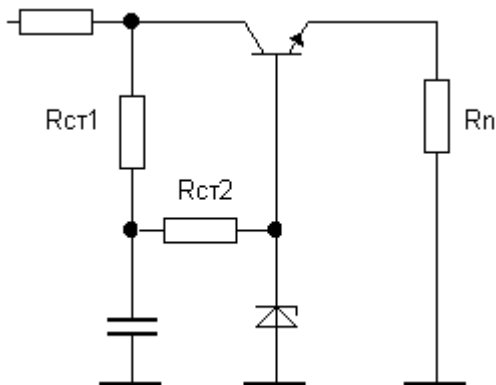
В цепи коллектора ставят ограничивающий резистор, чтобы транзистор не сгорел.



Составной транзистор усиливает в произведение коэффициентов усиления.

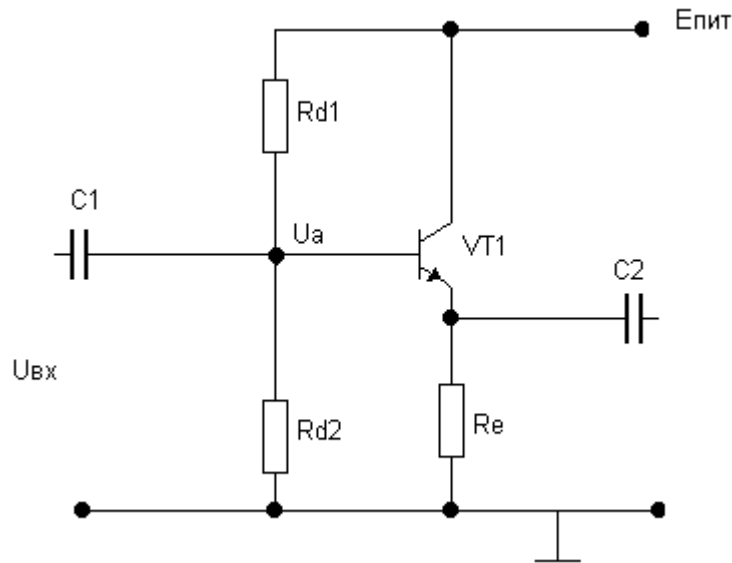


$$I_{e2} = (B_2 + 1) * I_{b2}; I_{b2} = I_{k1}; I_{k1} = B * I_{b1}; I_{e2} = (B_2 + 1) * B_1 * I_{b1} \approx B_2 * B_1 * I_{b1}$$



емкость конденсатора должна быть больше; чем RC – больше, тем низкочастотные помехи будут на земле.

Расчет схемы эмиттерного повторителя.



$$1). U_{vyx} = \frac{En}{2};$$

2). Выбираем ток I_{ke} .

$$I_e = 1 \text{ mA}; \quad R_e = \frac{En/2}{I_e} = \frac{5}{10^{-3}} = 5 \text{ КОм}$$

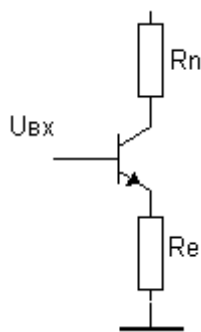
$$3). U_a = U_{be} + U_{re} = 0,6 + 5 = 5,6 \text{ В}$$

$$R_d(\parallel) \ll R_e \cdot B;$$

$$R_d(\parallel) = 50 \text{ КОм.}$$

$$\frac{R_{d1}}{R_{d2}} = \frac{4,4}{5,6}; \quad R_d(\parallel) = 50 \text{ КОм.}$$

Генератор тока на n-p-n транзисторе.

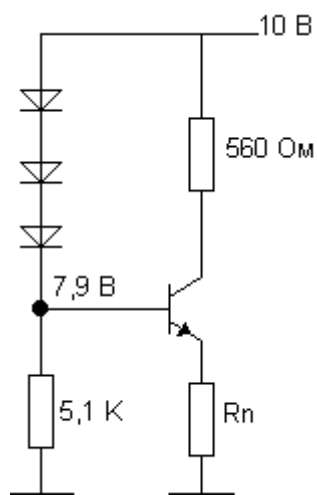
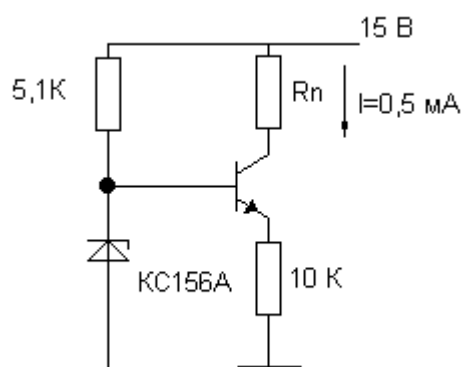
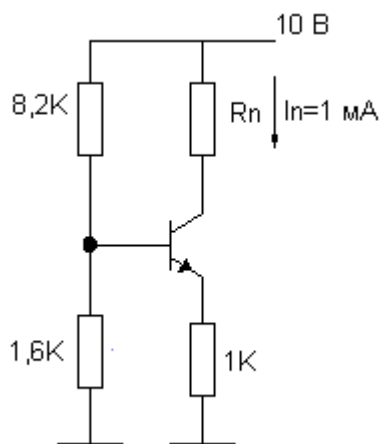


$$U_{re} = U_{vx} - 0,6; \quad I_e = \frac{U_{re}}{R_e} = \frac{U_{vx} - 0,6}{R_e}; \quad I_k \sim I_e$$

$$I_n = I_k \approx \frac{U_{vx} - 0,6}{R_e}$$

I_k , в основном, зависит от U_{vx} .

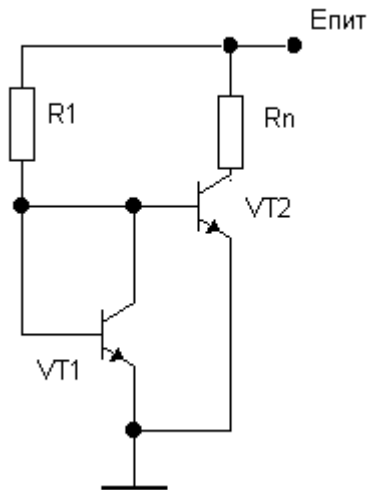
$$U_x > U_e + 0,2 \text{ В}$$



$$U_{re} = 10 - 8.5 - 1.5 \text{ V}$$

$$I = 1.5 \text{ V} / 560 \Omega = 3 \text{ mA}$$

Токоотводы (генераторы тока в едином технологическом цикле).



$$U_{be1} = U_{be2}; I_k = I_{kk0} * \exp\left(\frac{U_{be}}{m * \varphi_T}\right);$$

$$m * \varphi_T * \ln\left(\frac{I_{k1}}{I_{kk0_1}}\right) = m * \varphi_T * \ln\left(\frac{I_{k2}}{I_{kk0_2}}\right)$$

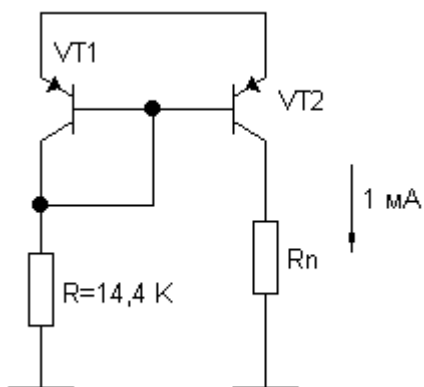
$$\frac{I_{k1}}{I_{kk0_1}} = \frac{I_{k2}}{I_{kk0_2}}; I_{k2} = I_n - \text{по схеме}$$

$$I_n = \frac{I_{k1} * I_{kk0_2}}{I_{kk0_1}} = I_{k1} * \frac{j_2 * S_{e2}}{j_1 * S_{e1}}; I_{kk0} = j * S_e$$

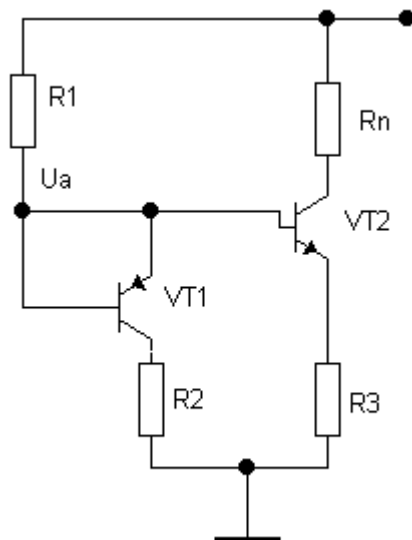
Схема очень термостабильна. Нет зависимости U_{be} от температуры.

$$E_n = U_{r1} + U_{be1}$$

$$U_{r1} = E_n - U_{be1} = 9,4B; I_{k1} = I_n; R_1 = 9,4 \text{ КОм}; I_n = 1 \text{ мА}.$$



Диодно-резистивный токоотвод.



$$U_a = U_{be1} + I_1 * R_2 = U_{be2} + I_n * R_3;$$

$$m * \varphi_T * \ln\left(\frac{I_k}{I_{o1}}\right) + I_1 * R_2 = m * \varphi_T * \ln\left(\frac{I_n}{I_{o2}}\right) + I_n * R_3$$

$$I_n = I_1 * \frac{R_2}{R_3} + \frac{m * \varphi_T}{R_3} * \ln\left(\frac{I_1 * I_{o2}}{I_n * I_{o1}}\right);$$

$$I_n = I_1 * \frac{R_2}{R_3}$$

Для этой схемы параметры тока нагрузки не зависят от свойств транзистора, а зависят только от R_2 и R_3 . Это важно, так как в пределах одной технологии данный тип токоотвода позволяет получать более мощные генераторы тока.

Дифференциальный усилитель.

Это схемное построение, которое используется для усиления разности двух входных напряжений. В идеальном ДУ выходной сигнал не зависит от собственного уровня каждого из входных сигналов, а определяется только их разностью.

Когда уровни сигналов на выходах ДУ изменяется одновременно, то такое изменение входного сигнала называется синфазным.

Разностный сигнал называют полезным или нормальным. ДУ используют в случае, когда слабый входной сигнал можно потерять на уровне шумов или помех. Для этого ДУ должен иметь высокий коэффициент ослабления синфазного сигнала.

КОСС – коэффициент ослабления синфазного сигнала, представляет собой отношение выходного полезного сигнала к выходному синфазному.

При условии, что полезный и синфазный сигнал имеют одинаковую амплитуду на входе.

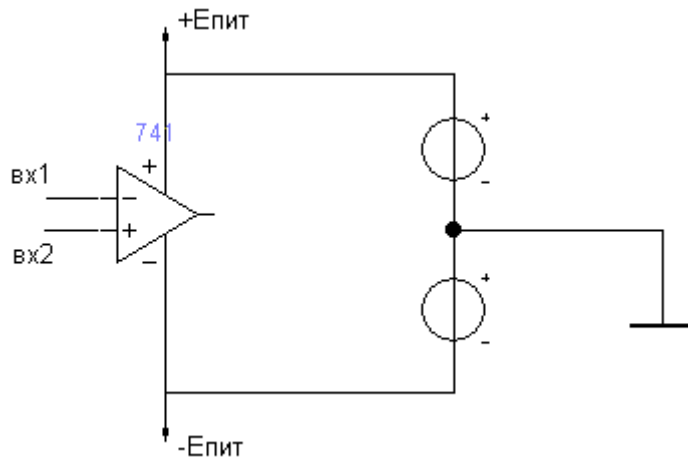
КОСС измеряется в децибелах.

Достоинства ДУ:

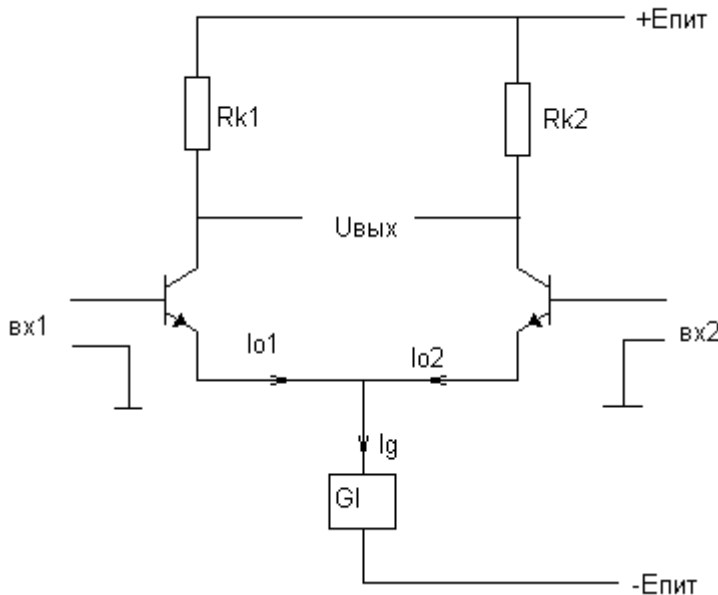
1. ДУ способны усиливать частоты от 0 герц (способны усиливать постоянный ток, так как нет необходимости использовать переходные межкаскадные емкости).
2. В ДУ очень легко вводится режим термостабилизации.
3. При малом отношении полезного сигнала к шуму в линии передачи восстанавливают первоначальный передаваемый сигнал.

Недостатки ДУ:

- использование ДУ предполагает два источника питания.



Дифференциальный каскад.



Напряжение выхода снимается между коллекторами транзисторов.

$R_{k1}=R_{k2}$; $I_{k1}=I_{k2}$ (в нормальном состоянии).

$$I_g = I_{01} + I_{02}$$

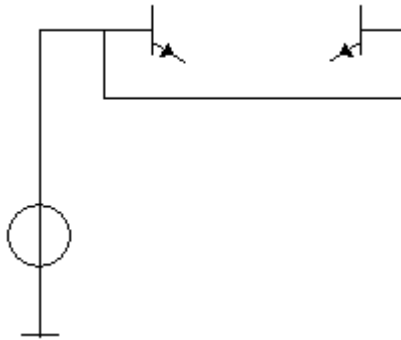
$$I_g = \text{const} = I_1 + I_2 = [I_1 = I_{01} + \Delta i; I_{01} = I_{k1}] = (I_{01} + \Delta i) + (I_{02} - \Delta i)$$

$$U_{\text{вых}} = U_{R1} - U_{R2} = I_{k1} * R_{k1} + \Delta i * R_{k1} - I_{k2} * R_{k2} + \Delta i * R_{k2} = [I_{k1} = I_{k2}; R_{k1} = R_{k2}] = \\ = 2 * \Delta i * R_k = 2 * \Delta U_{03}$$

$$\begin{aligned}
Ku_{\text{диф}} &= \frac{U_{k1} - U_{k2}}{U_{vx_{\text{диф}}}} = \frac{i_1 * Rk_1 - i_2 * Rk_2}{U_{vx_{\text{диф}}}} = \frac{i_1 * Rk_1 * (1 - \frac{i_2}{i_1} * \frac{Rk_2}{Rk_1})}{U_{vx_{\text{диф}}}} = \\
&= [U_{vx_{\text{диф}}} = U_{vx_1} - U_{vx_2}]; U_{vx_1} = Ur_{\delta_1} + Ure_1; U_{vx_2} = Ur_{\delta_2} + Ure_2; Ur_{\delta} = i_{\delta} * r_{\delta}; Ure_1 = r_{e1} * i_1] = \\
&= \frac{i_{k1} * Rk_1 * (1 - \frac{i_2}{i_1} * \frac{Rk_2}{Rk_1})}{(r_{\delta_1} * \frac{i_1}{B_1} + r_{e1} * i_1) - (r_{\delta_1} * \frac{i_2}{B_2} + r_{e2} * i_2)} = [Ig = I_1 + I_2 = const; i_1 + i_2 = 0; r_{e1} = r_{e2}; i_1 = -i_2; r_{b1} = r_{b1}] = \\
&= \frac{Rk_1 + Rk_2}{2 * (\frac{r_{b1}}{B_1} + r_{e1})}
\end{aligned}$$

Вывод: в общем случае дифференциальный коэффициент усиления не определяется симметричностью структуры.

Поведение ДУ на синфазном сигнале.

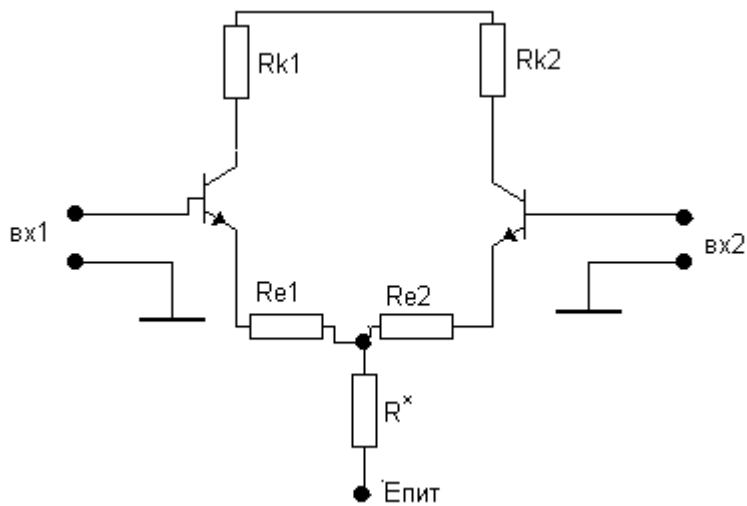


Когда на вход подан синфазный сигнал (в идеале ДУ) напряжение выхода равно нулю.

$$Ku_{\text{сф}} = - \frac{Rk}{\frac{r_b}{B} + r_e + 2 * R^*}$$

Коэффициент усиления синфазного напряжения очень сильно зависит от характеристического сопротивления генератора тока. Для улучшения параметров ДУ нужно его увеличить.

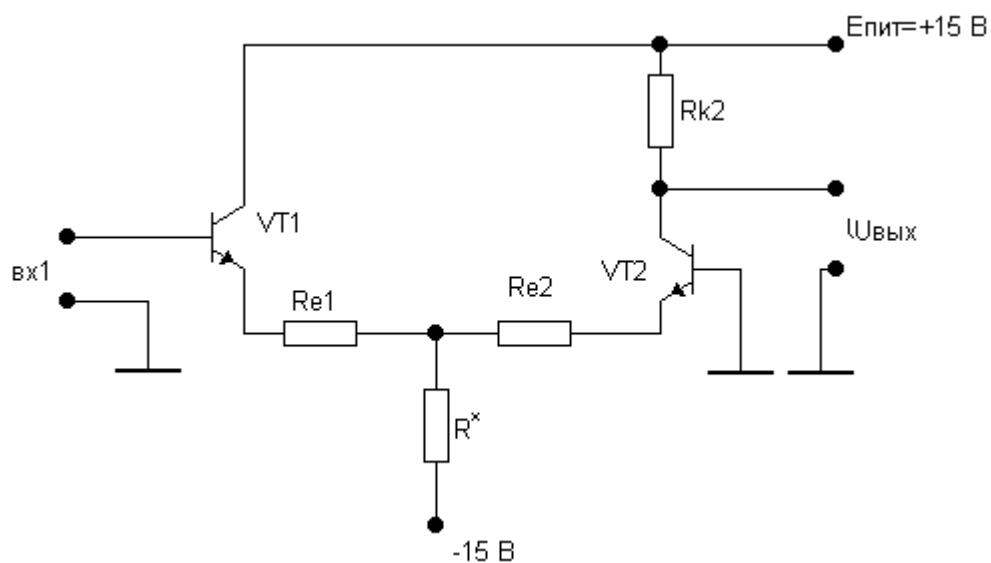
Расчет обыкновенных дифференциальных усилителей.



$$Ku_{диф} = \frac{Rk_1 + Rk_2}{2 * (Re + r_e + \frac{r_b}{B})}$$

$$Ku_{сум} = \frac{2 * Rk}{2 * R^* + r_e + Re + \frac{r_b}{B}}$$

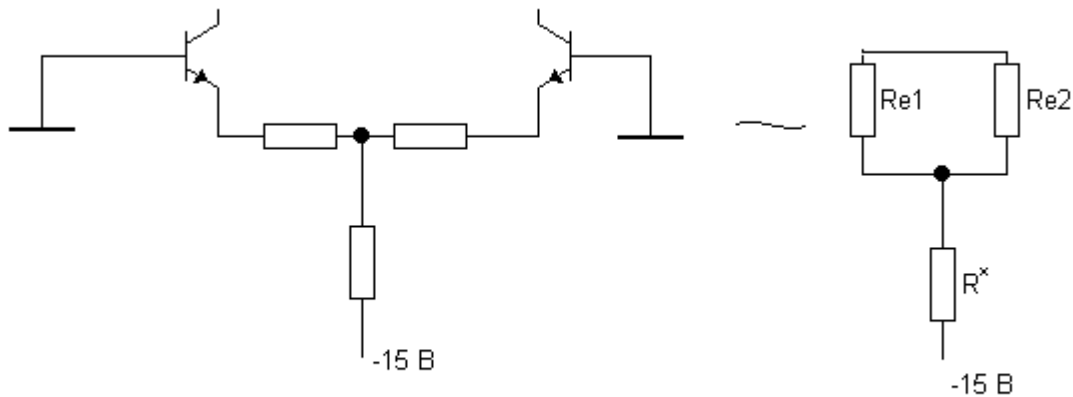
Упрощенная схема.



1). Задаем $I_{k02} = 100 \text{ мкА}$.

$$2). Rk_2 = \frac{U_{rk_2}}{I_{k_2}} = \frac{\frac{E_n}{2}}{I_{k_2}} = \frac{7,5B}{10^{-4} A}$$

3). Заземлим входы.



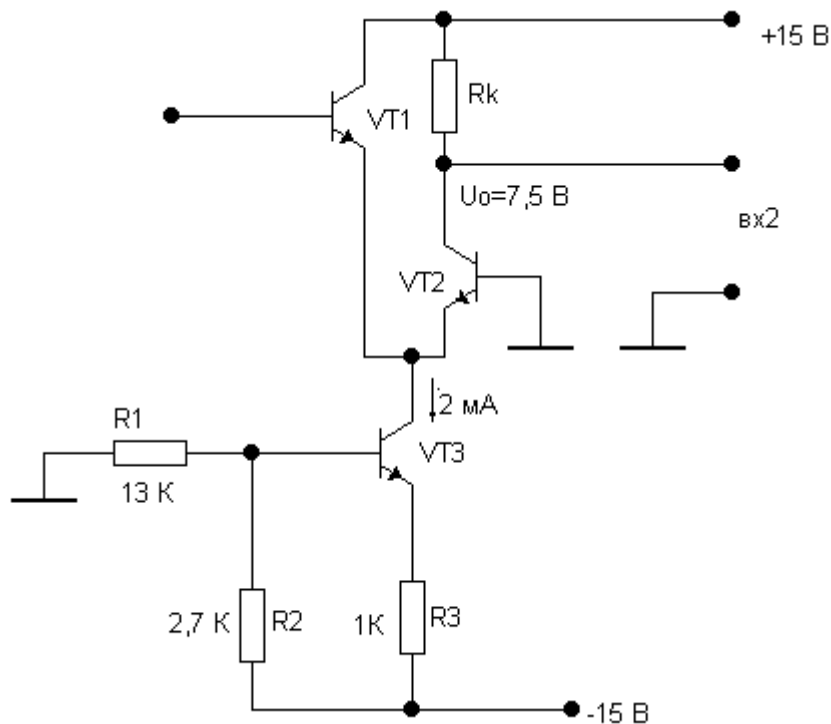
$$R^* = \frac{14,4}{10^{-4}} = 72 \text{ КОм.}$$

$$Ku_{\text{диф}} = \frac{Rk_2}{2 * (Re + r_e + \frac{r_b}{\beta})} = \frac{75 \text{ КОм}}{2 * (1 \text{ КОм} + 25 \text{ Ом})} = 33$$

$$Ku_{\text{сиф}} = - \frac{Rk}{2 * R^* + Re + r_e} = - \frac{75 * 10^3}{2 * 72 * 10^3 + 25} = 0,5$$

(минус показывает, что он ослабляет). Все зависит от R^* .

Замена R^* на GI.



$$Rk = \frac{En}{Ik} = \frac{7,5}{10^{-3}} = 7,5 \text{ КОм.}$$

КОСС=100дБ.

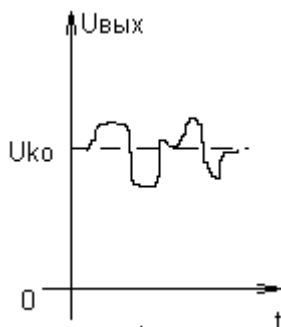
Диапазон входного сигнала: ограничен:

{ -12 В --- GI; +7В --- Uk₀ }

Если используем вход 1, то данная схема не инвертирует сигнал; если вход 2 то инвертирует.

В случае , если необходимо работать с усилением постоянного тока или с односторонним входным сигналом один из входов заземляют а на другой подают сигнал, в зависимости от того, какой нужен прямой или инверсный выходной сигнал.

Достоинства диф. каскада в том, что не используя на входе разделительную емкость на выходе получается односторонний смещенный сигнал.

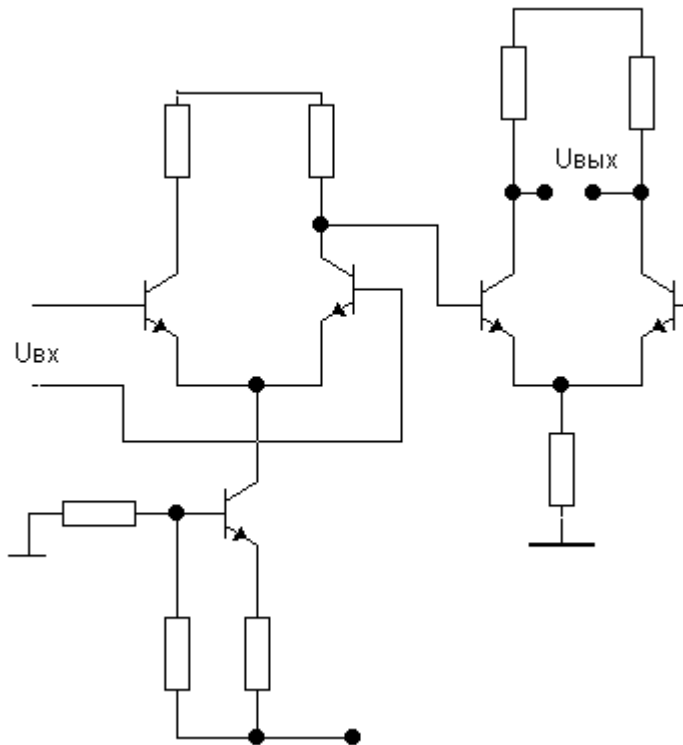


Следствие: на выходе нет необходимости использовать разделительные емкости или сдвиговые делители.

Достоинства: нет необходимости учитывать Ube.

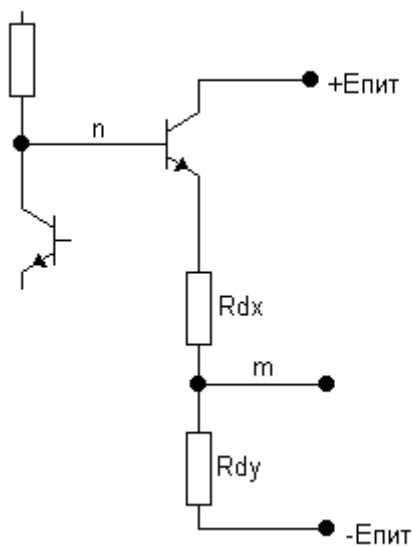
В случае исполнения диф. каскада если не хватает коэффициента усиления, то исполняют схему содержащую два диф. усилителя.

$$K_{\Sigma} = K_{dy1} * K_{dy2}$$



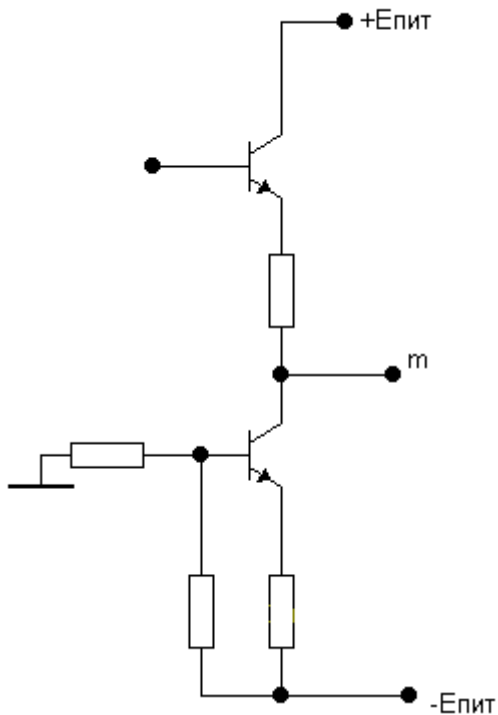
Для того чтобы иметь дело с диф. входами и симметричным выходом (когда выходной сигнал меняется относительно одного из выходов и земли) применяют каскад сдвига уровня.

Каскад сдвига уровня.



Стремятся получить в точке М с помощью делителей Rdx и Rdy относительно земли 0. В состоянии покоя (то есть при отсутствии входного диф. напряжения).

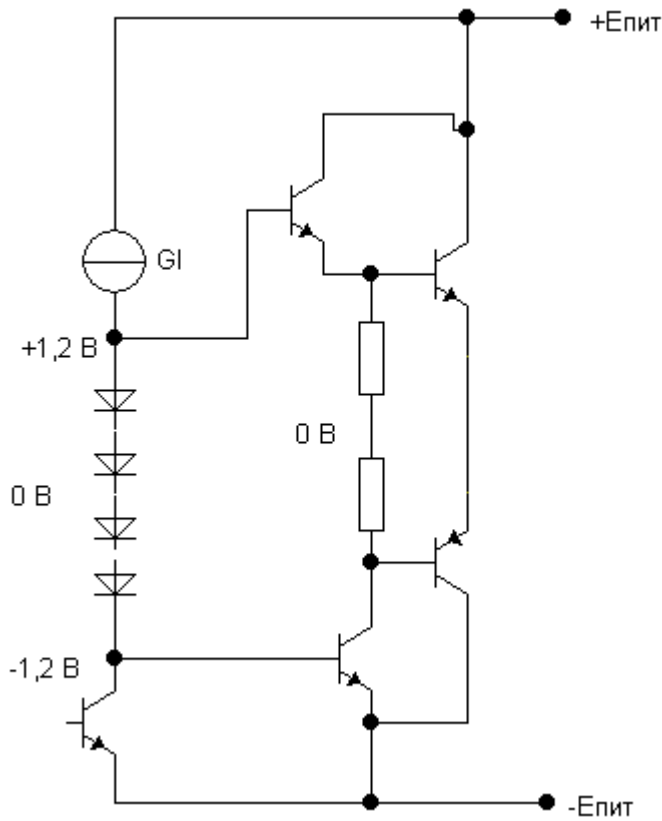
Вместо делителя R_{dy} рекомендуется использовать генератор тока.



Появилось приращение ΔU , следовательно транзистор должен больше пропустить ток, но генератор стабилизирует, следовательно он должен увеличить напряжение в точке M , чтобы стабилизировать.

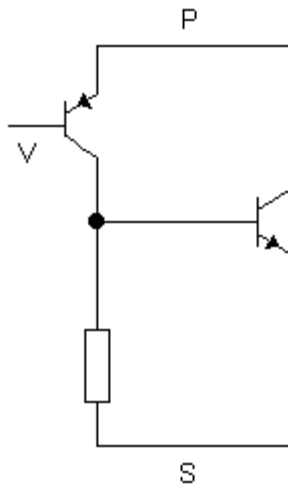
Выходной каскад ОУ.

Выходной каскад добавляют для того, чтобы увеличить выходную амплитуду, усилить выходной сигнал.

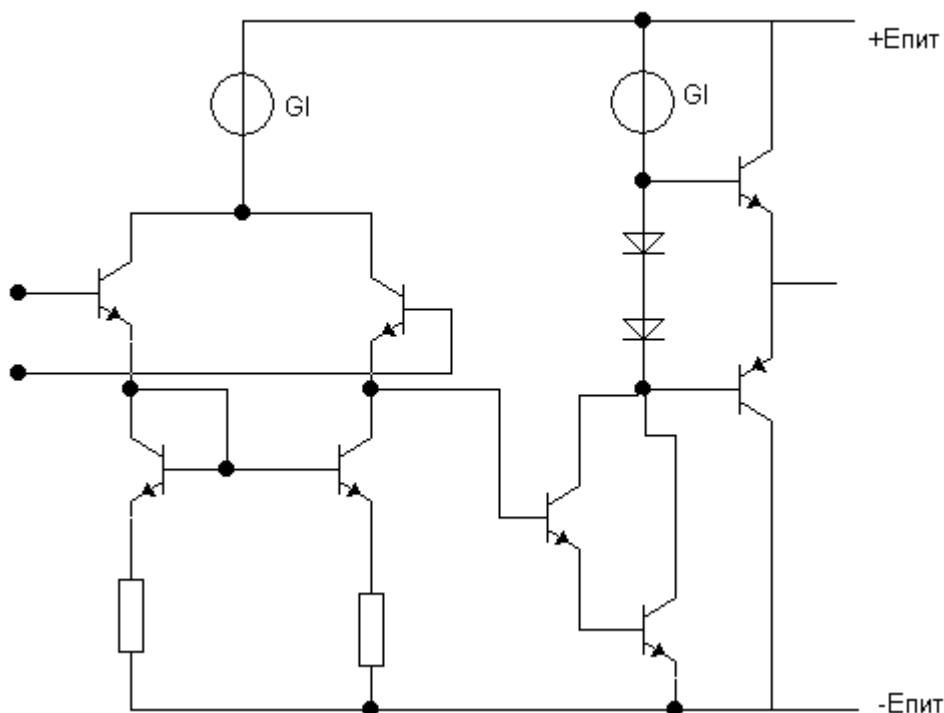


Изготовление подряд 4-х диодов имеет ряд трудностей, так как нужно изготовить 4 изолирующих области, следовательно 4 диода заменили схемой (стабистор).

Изготовление мощного р-п-р транзистора связано с технологическими трудностями, его заменяют схемой.



Типовая схема ОУ марки $\mu\alpha 741(140\text{уд}7)$



ОУ.

Это электрическая схема, реализованная на одном кристалле с непосредственными электрическими связями (без переходных конденсаторов), высоким коэффициентом усиления, малым уровнем собственных шумов, способная устойчиво работать при замкнутой цепи обратной связи и производить математические действия с электрическими сигналами, поданными на вход U . Результат действия снимается с выходов U .

Любой ОУ имеет минимум 5 выводов – прямой, инверсный входы, - и + питание, выход.

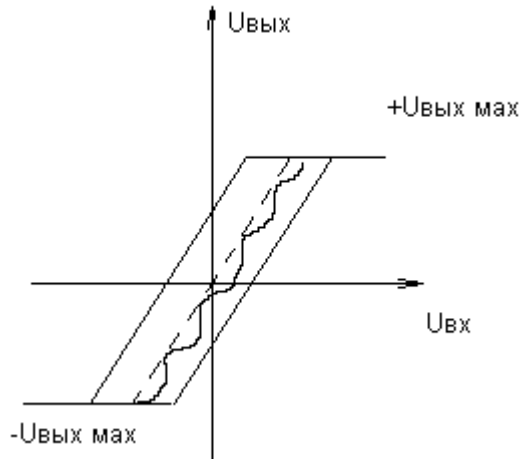
Часто вводятся дополнительные выводы: земли, цепи коррекции, цепи задания токопотребления и др.

Параметры идеального ОУ:

1. полоса пропускания равна бесконечности.
2. коэффициент усиления по напряжению K_u равно бесконечности.
3. коэффициент усиления синфазного напряжения равен 0.
4. входное сопротивление ОУ $r_{вх}$ равно бесконечности.
5. выходное сопротивление ОУ $r_{вых}$ равно 0.
6. максимальное выходное напряжение $U_{вых_{max}}$ равно бесконечности.
7. $U_{вых} = K_u * (U_{вх}^+ - U_{вх}^-)$
8. ток потребления $I_{потр}$ равен 0.
9. Епит равно 0.
10. Скорость нарастания $\frac{dU_{вых}}{dt} = \infty$, то есть сигнал нарастает мгновенно.

В общем случае параметрами ОУ называются наихудшие, с точки зрения потребителя, отклонения его характеристик от идеальных.

Передаточная характеристика ОУ.



Отрицательная обратная связь ОУ (ООС).

Процесс передачи выходного сигнала обратно на вход, при котором гасится часть входного сигнала (сигнал подается с выхода на вход в противофазе к входному сигналу) отрицательная обратная связь. Она улучшает работу схемы. Чем глубже ООС, тем меньше поведение ОУ зависит от неидеальности самого экземпляра ОУ.

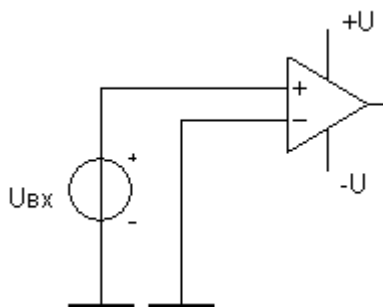
Доходит до того, что свойства схемы зависят только от свойств схемы с ООС.

Цепь ООС может быть частотно зависимой; коэффициент усиления тоже зависит от частоты; можно получить схемы – фильтры.

Если ОС зависит от амплитуды, то получаются различные преобразователи (интеграторы, логарифматоры и т.п.).

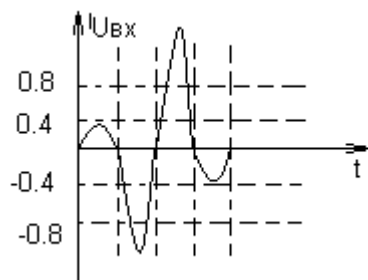
ОС можно использовать для создания генераторов тока и напряжения. ОС позволяет создавать коэффициент усиления, входное и выходное сопротивление.

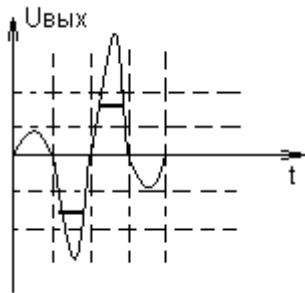
ОУ без ООС.



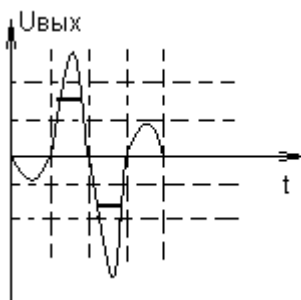
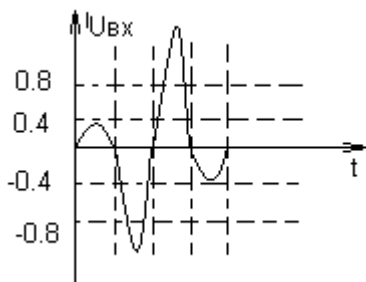
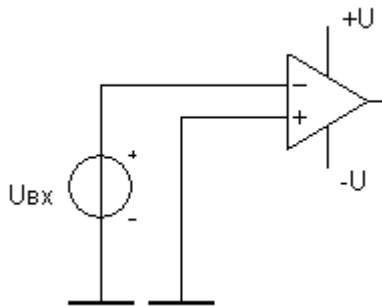
$74 \text{ дБ} < K_u < 100 \text{ дБ}$

$K_u = 10^4 \text{ раз.}$





Входной сигнал на инвертирующий вход.



Минимальное воздействие на входе приводит ОУ в насыщение. Чем лучше K_u тем быстрее он вводится в насыщение при отсутствии ООС.

$$K_u = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{U_{вых}}{U_2 - U_1}; U_{вхd}=0$$

$$-E_n + U < U_{вых} < +E_n - U$$

$$U = 1,5 \dots 6 \text{ В}$$

Чтобы получить амплитуду 10 В, нужно взять $U_{пит}=16 \text{ В}$.

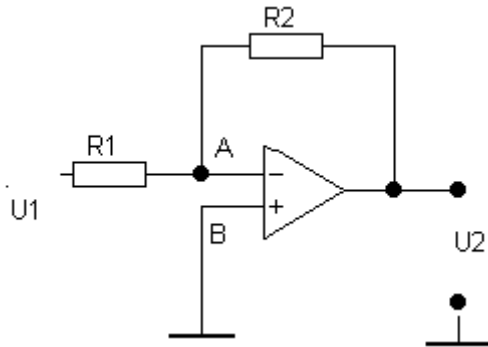
Правила анализа схем на ОУ, охваченных петлей обратной связи.

- 1). Выход ОУ стремится к тому, что бы разность между его входами была равна 0.
- 2). Входы ОУ тока не потребляют.

Пояснение к п.1.

ОУ не меняет напряжение на своих входах, он оценивает состояние входов и вырабатывает на выходе такое напряжение, которое с помощью ОС подается на вход, компенсируя этим самым разность напряжений на входах (она становится равной 0), если это возможно.

Инвертирующий ОУ.



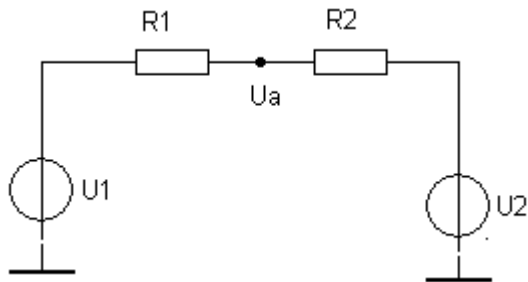
$$U_B=0; U_A=0$$

$$U_{R2}=U_{vyx}=U_2; U_{R1}=U_{vx}=U_1;$$

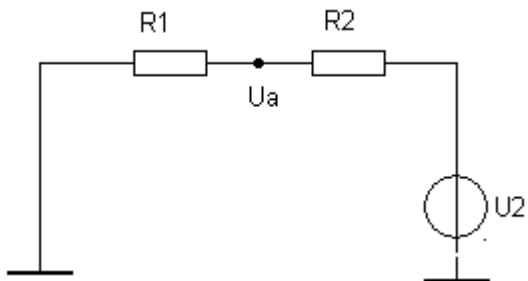
$$\frac{U_1}{R_1} = \frac{U_2}{R_2};$$

$$Ku = \frac{U_2}{U_1} = -\frac{R_2}{R_1}$$

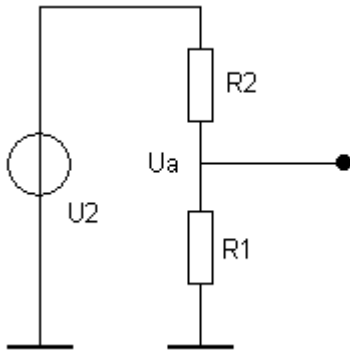
Эквивалентная схема.



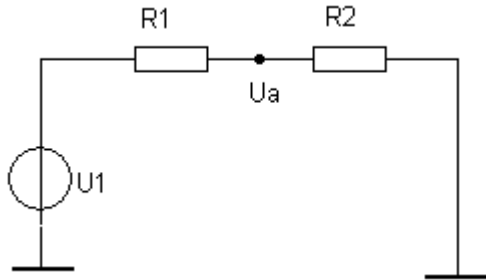
Пусть в некоторый момент времени $U_1=0$.



$$U_a = U_2 * \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$



Пусть $U_2=0$, тогда



$$U_a = U_1 * \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Общий случай:

$$U_a = U_2 * \frac{R_1}{R_1 + R_2} + U_1 * \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

согласно п.1. $U_a=U_b=0$, то есть уравнение можно приравнять к нулю.

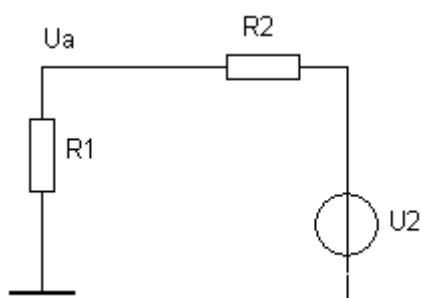
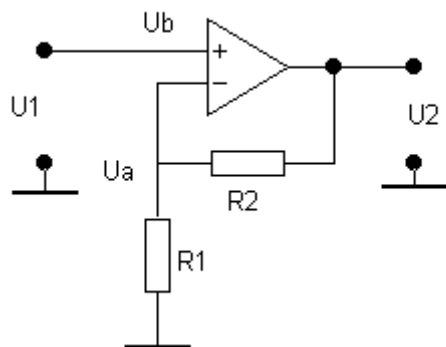
$$U_2 * \frac{R_1}{R_1 + R_2} + U_1 * \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 0$$

$$\frac{U_2}{U_1} * \frac{R_1}{R_1 + R_2} + \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 0$$

$$\frac{U_2}{U_1} * \frac{R_1}{R_1 + R_2} = -\frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$\frac{U_2}{U_1} * R_1 = -R_2; \quad Ku = \frac{U_2}{U_1} = -\frac{R_2}{R_1}$$

ОУ в неинвертирующем включении.



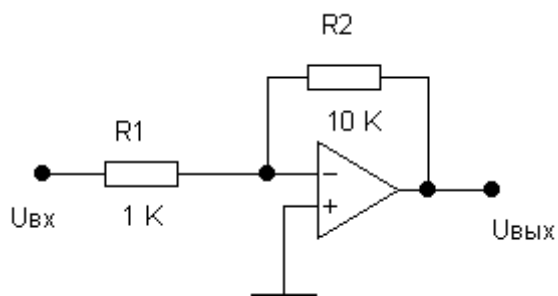
$$U_a = \frac{R_1}{R_1 + R_2} * U_2;$$

$$U_2 * \frac{R_1}{R_1 + R_2} = U_1$$

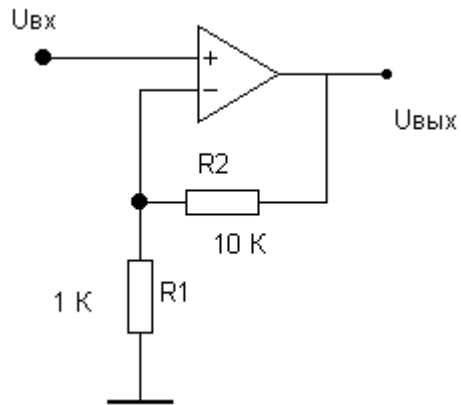
$$Ku = \frac{U_2}{U_1} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Сравнительная характеристика $r_{вх}$ этих ОУ.

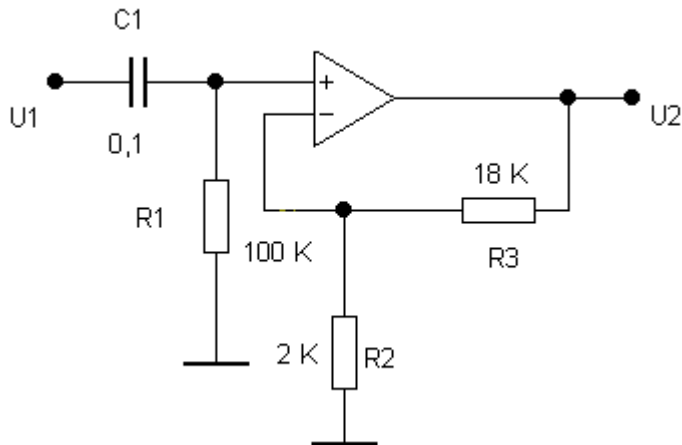
1.



2.



Усилитель переменного тока.



1). $R_{vx}=R_1$;

чтобы повысить K_u , нужно увеличить R_2 или уменьшить R_1 .

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

2). r_{vx} не зависит от K_u .

r_{vx} выше 10^{12} Ом. K_u –большой.

C_1 при постоянном токе имеет импеданс – сопротивление, равное бесконечности.

$$X_c = \frac{-1}{j * \omega * C};$$

$$a + jb$$

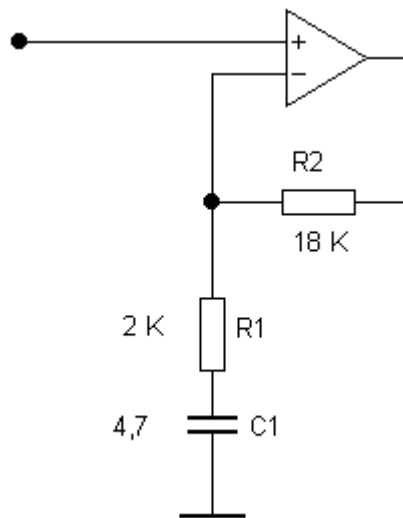
$$Re = \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$Re(X_c) = \frac{-1}{\omega * C} = \frac{1}{2 * \pi * f * C}$$

Для $I=\text{const}$ $Re=\infty$.

$$f_{-3db} = \frac{1}{2 * \pi * C * R_1} = \frac{1}{6,28 * 10^{-7} * 10^5} \approx 17 \text{ Гц.}$$

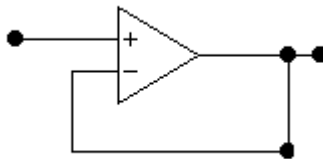
$$Ku = 10 = \left(\frac{R_2}{R_1} + 1\right)$$



На $I = \text{const}$ $Ku = 1$. (он усиливает только переменный ток).

При необходимости сделать усилитель переменного тока с большим коэффициентом усиления необходимо учесть, что емкость C_1 может оказаться очень высокой.

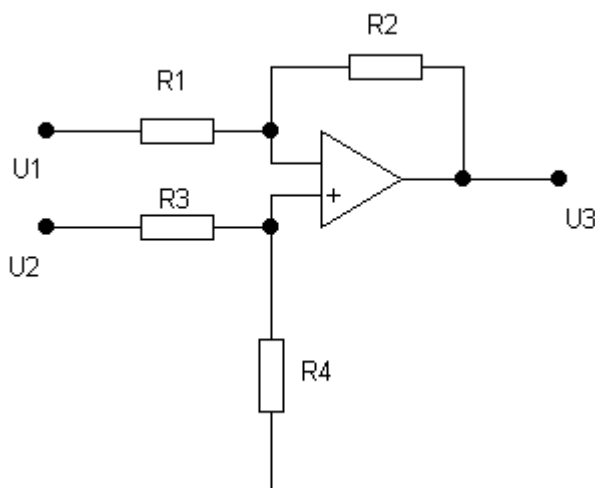
Повторитель.



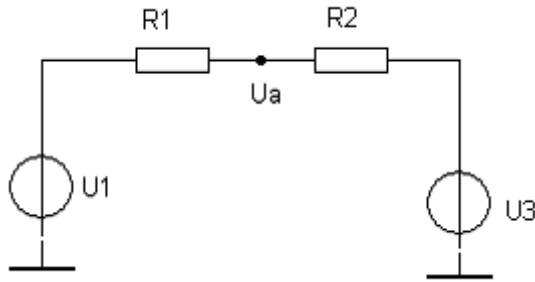
Задача буфера согласование полных входных и выходных сопротивлений. В роли входного резистора выступает собственное входное сопротивление усилителя, выходное сопротивление данной схемы за счет действия ОС равно доли Ома при входном 10^{12} - 10^{15} Ом.

Анализ ДУ.

ОУ исполняется как усилитель диф. сигнала.

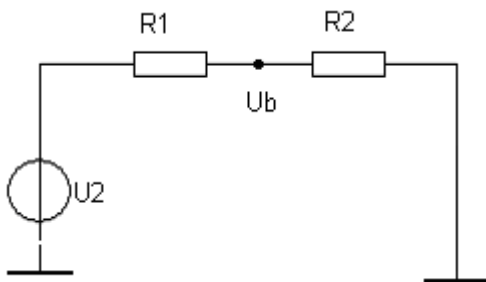


Относительно U_a :



$$U_a = U_3 * \frac{R_1}{R_1 + R_2} + U_1 * \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Относительно U_b :



$$U_b = U_a = U_2 * \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

$$U_2 * \frac{R_4}{R_3 + R_4} = U_3 * \frac{R_1}{R_1 + R_2} + U_1 * \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$U_3 * \frac{R_1}{R_1 + R_2} = U_2 * \frac{R_4}{R_3 + R_4} - U_1 * \frac{R_2}{R_1 + R_2} = [R_1 = R_3; R_2 = R_4]$$

В дифференциальном усилителе должно соблюдаться условие. $[R_1 = R_3; R_2 = R_4]$

$$\text{Тогда, } U_3 * \frac{R_1}{R_1 + R_2} = U_2 * \frac{R_2}{R_1 + R_2} - U_1 * \frac{R_2}{R_1 + R_2} = (U_2 - U_1) * \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$U_3 * R_1 = (U_2 - U_1) * R_2$$

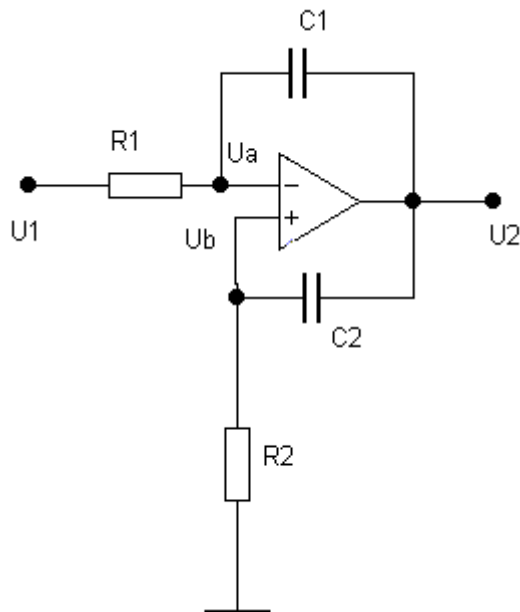
$$U_3 = \frac{R_2}{R_1} * (U_2 - U_1) * R_2$$

В это случае не важны значения каждого U_1 и U_2 , важна разность $U_1 - U_2$ – это и есть $U_{\text{вх.диф.}}$

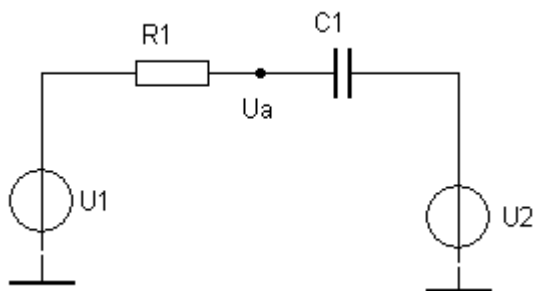
Если $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$, то $U_3 = (U_2 - U_1)$

КОСС зависит от точности подбора R .

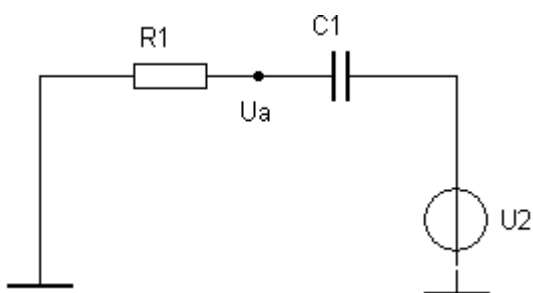
Математический анализ произвольной схемы.



Эквивалентная схема:



$$U_a = U_2 * \frac{R_1}{R_1 + X_{C1}} + U_1 * \frac{X_{C1}}{R_1 + X_{C1}};$$



$$U_a = U_b = U_2 * \frac{R_2}{R_2 + X_{C2}}$$

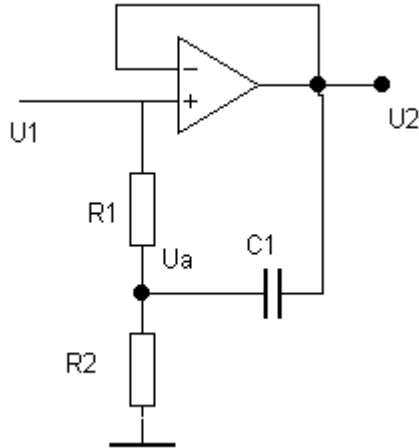
$$U_2 * \frac{R_2}{R_2 + X_{C2}} = U_2 * \frac{R_1}{R_1 + X_{C1}} + U_1 * \frac{X_{C1}}{R_1 + X_{C1}}$$

$$U_2 * \left(\frac{R_2}{R_2 + X_{C2}} - \frac{R_1}{R_1 + X_{C1}} \right) = U_1 * \frac{X_{C1}}{R_1 + X_{C1}}$$

$$U_2 = U_1 * \frac{X_{C1}}{R_1 + X_{C2}} * \left(\frac{R_2}{R_2 + X_{C2}} - \frac{R_1}{R_1 + X_{C1}} \right)^{-1}$$

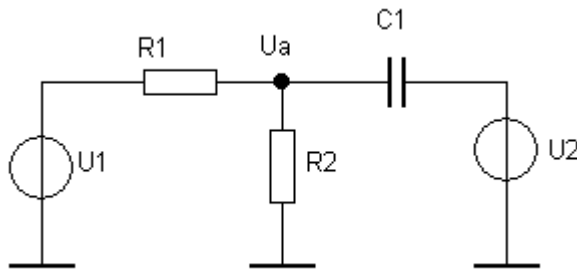
$$X_{C1} = \frac{1}{2 * \pi * f * C_1}; \quad X_{C2} = \frac{1}{2 * \pi * f * C_2}$$

$$Ku = \frac{U_2}{U_1} = \left(\frac{R_2}{R_2 + X_{C2}} - \frac{R_1}{R_1 + X_{C1}} \right)^{-1}$$



$$r_{vx} = \frac{U_{vx}}{i_{vx}} = \frac{U_1}{i_{R1}}; \quad i_{R1} = \frac{U_1 - Ua}{R_1}$$

Эквивалентная схема:



$$Ua = U_2 * \frac{R_1 \parallel R_2}{X_{C1} + R_1 \parallel R_2} + U_1 * \frac{R_2 \parallel X_{C1}}{R_1 + R_2 \parallel X_{C1}} = [U_1 = U_2] = U_1 * \left(\frac{R_1 \parallel R_2}{X_{C1} + R_1 \parallel R_2} + \frac{R_2 \parallel X_{C1}}{R_1 + R_2 \parallel X_{C1}} \right)$$

$$i_{R1} = \frac{U_1 - U_1 * \left(\frac{R_1 \parallel R_2}{X_{C1} + R_1 \parallel R_2} + \frac{R_2 \parallel X_{C1}}{R_1 + R_2 \parallel X_{C1}} \right)}{R_1} = \frac{U_1 * \left(1 - \left(\frac{R_1 \parallel R_2}{X_{C1} + R_1 \parallel R_2} + \frac{R_2 \parallel X_{C1}}{R_1 + R_2 \parallel X_{C1}} \right) \right)}{R_1}$$

$$r_{vx} = \frac{U_1}{U_1 * \frac{1 - \left(\frac{R_1 \parallel R_2}{X_{C1} + R_1 \parallel R_2} + \frac{R_2 \parallel X_{C1}}{R_1 + R_2 \parallel X_{C1}} \right)}{R_1}} = \frac{R_1}{1 - \left(\frac{R_1 \parallel R_2}{X_{C1} + R_1 \parallel R_2} + \frac{R_2 \parallel X_{C1}}{R_1 + R_2 \parallel X_{C1}} \right)}$$

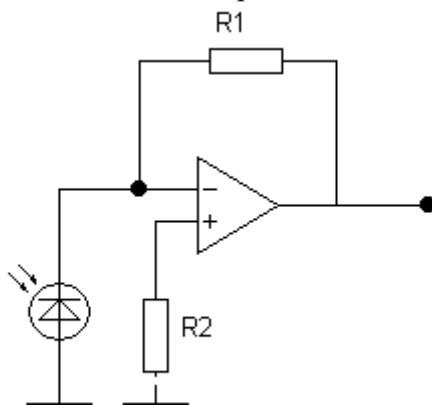
Следовательно, будем говорить о сопротивлении схемы на определенной частоте.

Предостережение при работе с ОУ.

- 1). Правила 1,2 справедливы для любого ОУ если он находится в активном режиме (то есть входы и выходы не перегружены; если наступает ограничение выходной амплитуды, то выходной сигнал не меняется, тем самым не подстраивая входной сигнал. Все это нарушает нормальный режим работы ОУ).
- 2). Обратная связь в схеме должна быть отрицательна.
- 3). В схеме, в которой используется ОУ должна быть предусмотрена и просчитана ОС по постоянному току иначе ОУ наверняка попадет в режим насыщения.
- 4). Нужно учитывать, что меньшие ОУ имеют малодопустимое диф. входное напряжение(что и представляет максимальную разность напряжений между инвертируемыми и неинвертируемыми входами). Обычно это значение ограничено 5-6 В для любой полярности напряжения. Если это не учесть, то возникают очень большие входные токи, которые разрушают ОУ.

Преобразователь тока в напряжение.

Для источника входного сигнала сопротивление такого преобразователя плохо сказывается на работоспособности, особенно для устройств, имеющих очень маленький выходной диапазон, или для устройств, которые не могут обеспечивать постоянство тока при изменении выходного напряжения.

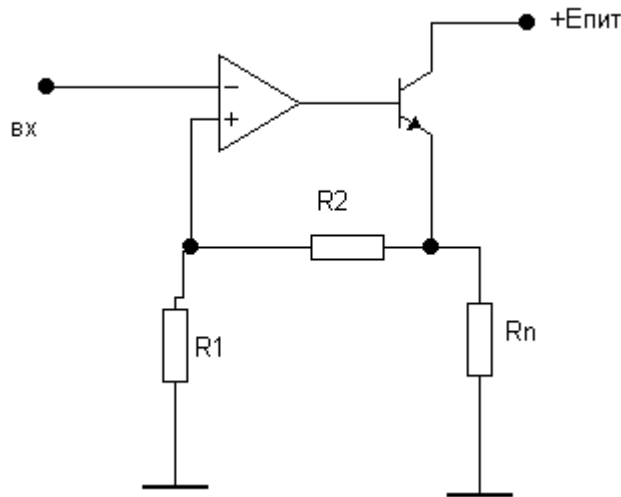


Бустер – усилитель мощности.

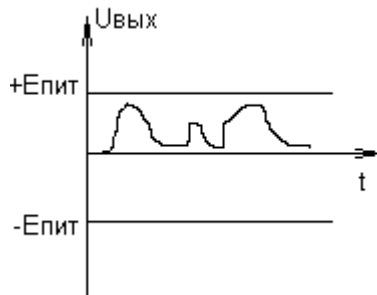
Выходная мощность ОУ обычно составляет от 100 мВт до 100 Вт, но часто этого не хватает. Для получения больших токов применяют дополнительные транзисторы.

Схема с эмиттерным повторителем.

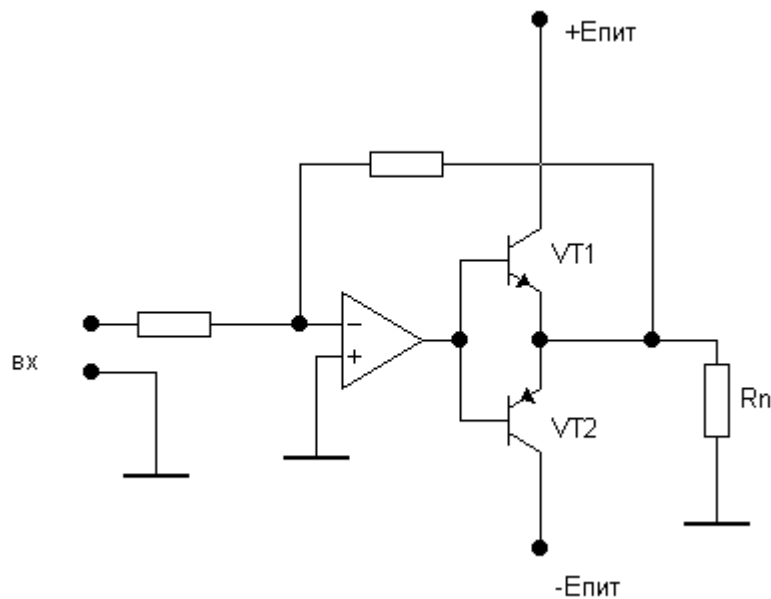
$$I_k = I_b * B$$



То обстоятельство, что сигнал ОС снимается с эмиттера позволяет рассматривать связку ОУ + VT как обыкновенный ОУ только с выносным выходным транзистором. ОС определяет необходимое напряжение независимо от U_{be} . Данная схема позволяет получать выходной сигнал только в положительной области выходных напряжений.



Для того чтобы получать выходной сигнал и – и + области, необходимо использовать двухтактный выходной каскад.

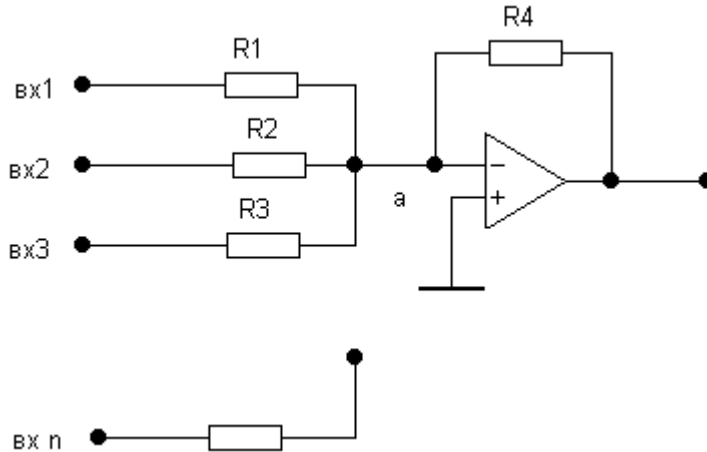


Так как ОС снимается с эмиттера транзистора она учитывает падение на U_{be} и можно в расчетах применять как единый ОУ с мощным двухтактным выходом.

Ограничения:

Схема нормально работает в области низких частот, удовлетворительно с области средних, в области ВЧ возникает сильное искажение и может произойти самовозбуждение.

Суммирующий усилитель.



$$i_a = i_{R1} + i_{R2} + i_{R3} = \frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \frac{U_3}{R_3}; \quad i_a = -i_{R4} = -\frac{U_{вых}}{R_4}$$

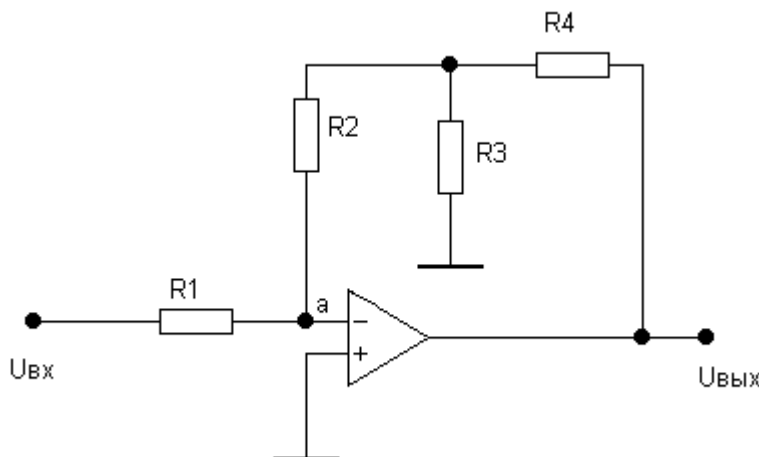
$$\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \frac{U_3}{R_3} = -\frac{U_{вых}}{R_4}; \quad [R_1 = R_2 = R_3 = R_4]$$

$$U_{вых} = -(U_1 + U_2 + U_3)$$

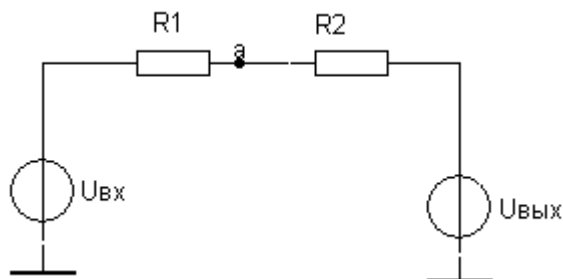
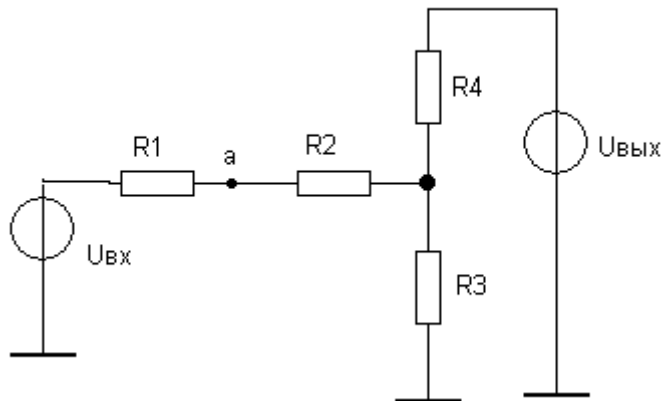
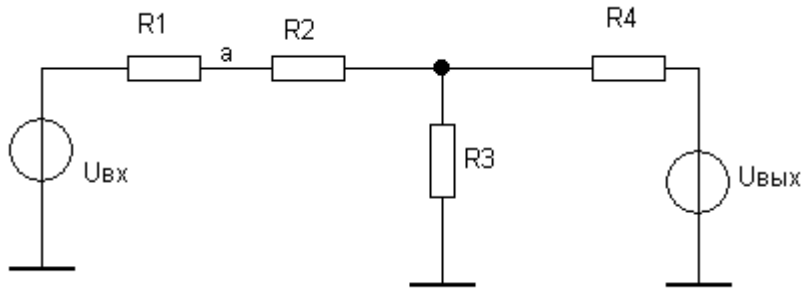
Напряжение на выходе равно алгебраической сумме входных напряжений. Необходимо что бы $R_1=R_2=.....$. В случае, если они не одинаковы, то получают взвешенную сумму. Ряд резисторов равен 10 КОм, 5КОм, 2,5КОм, 1,25КОм – ряд R-2R.

Напряжение выхода в этом случае будет пропорционально двоичному числу на входе, и как следствие, схема будет представлять собой простейший цифроаналоговый преобразователь.

Важный прием построения ОС в усилителях на ОУ.



Эквивалентная схема:



$$U_a = U_{вх_экв} * \frac{R_1}{R_1 + R_2} + U_{вх} * \frac{R_2}{R_2 + R_3}$$

$$K_{u_экв} = \frac{U_{вх_экв}}{U_{вх}} = - \frac{\frac{R_2}{R_1 + R_2}}{\frac{R_1}{R_1 + R_2}} = - \frac{R_2}{R_1}$$

$$U_{вх_экв} = U_{вх} * \frac{R_3}{R_3 + R_4}$$

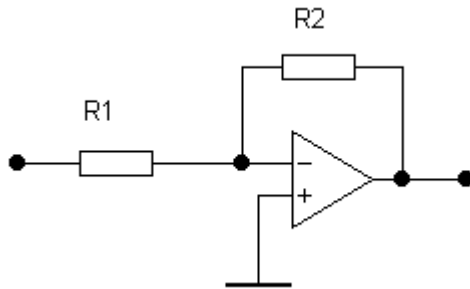
$$\frac{U_{вх_экв}}{U_{вх}} = - \frac{R_2}{R_1} \quad [U_{вх_экв} = \frac{R_3}{R_4 + R_3} * U_{вх}]$$

$$K_u = \frac{U_{вх} * \frac{R_3}{R_3 + R_4}}{U_{вх}} = - \frac{R_2}{R_1} ; \quad K_u = \frac{U_{вх}}{U_{вх}} = - \frac{R_2 * (R_3 + R_4)}{R_1 * R_3}$$

$$Ku = -\frac{R_2 * (R_3 + R_4)}{R_1 * R_3}$$

Анализируем

$$Ku = -\frac{R_2}{R_1}$$



В данной схеме при необходимости получить высокий Ku нужно либо уменьшать R_1 , или увеличить R_2 . при уменьшении R_1 уменьшается сопротивление входа, что часто плохо.

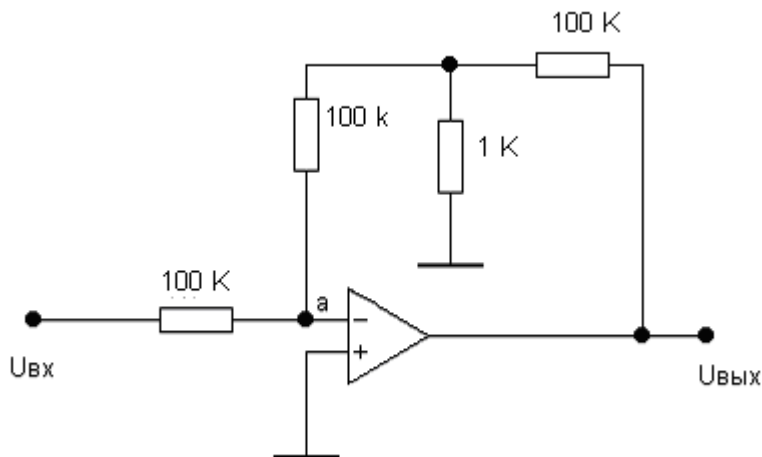
R_2 нельзя увеличивать до бесконечности по той причине, что при его высоком номинале сказывается влияние собственной емкости резистора.

Пусть собственная емкость $R_2=10\text{пф}$, при этом его сопротивление 1 Мом, следовательно время заряда этой цепочки:

$$T = R * C = 10 * 10^{-12} * 10^6 = 10^{-5} \text{ с.}$$

$$f_{gr} = \frac{1}{T} = 100000 \text{ Гц.}$$

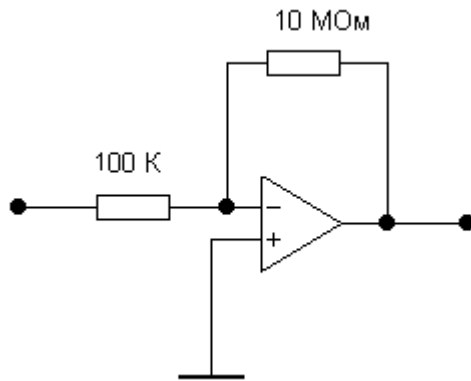
Несмотря на то, что собственная максимальная частота ОУ может существенной превышать эти пределы, схема не сможет работать на частоте выше 100 КГц.



$$Ku = -\frac{R_2 * R_3 + R_2 * R_4}{R_1 * R_3}$$

Видно, что числитель и знаменатель для Ku пропорциональны не R , а произведению некоторого $R_n * R_m$. Следовательно появляется возможность использовать резисторы с

меньшим номиналом, следовательно влияние $t=RC$ будет мало и граничная частота собственно будет определяться свойствами этого ОУ.



Чтобы $K_u=100=-\frac{10\text{МОм}}{100\text{КОм}}$

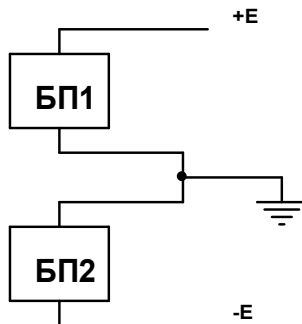
$$K_u = -\frac{R_2 * R_3 + R_2 * R_4}{R_1 * R_3} = [\text{пусть } R_1 = R_2 = R_4] = -\frac{R_2}{R_1} * \left(\frac{R_3 + R_4}{R_3}\right) = -\frac{R_3 + R_4}{R_3} = \frac{R_3 + 100\text{КОм}}{R_3}$$

Если $R_3=1\text{КОм}$, то $K_u=100/$

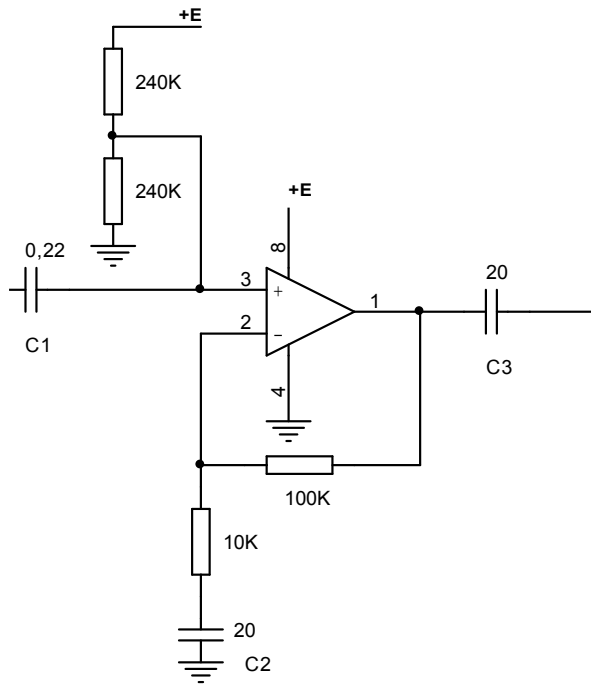
K_u в одной и другой схеме одинаков., но максимальный номинал резистора меньше в 100 раз, следовательно граничная частота второй схемы выше.

Использование одного источника питания ОУ при реализации усилителя переменного сигнала.

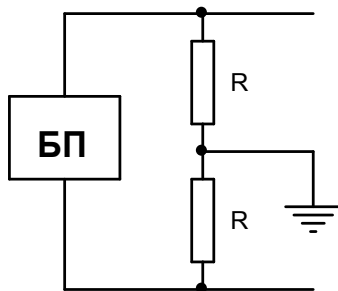
Для питания ОУ обычно применяют 2-х полярные источники питания.



Но это не удобно и применяют следующую схему:

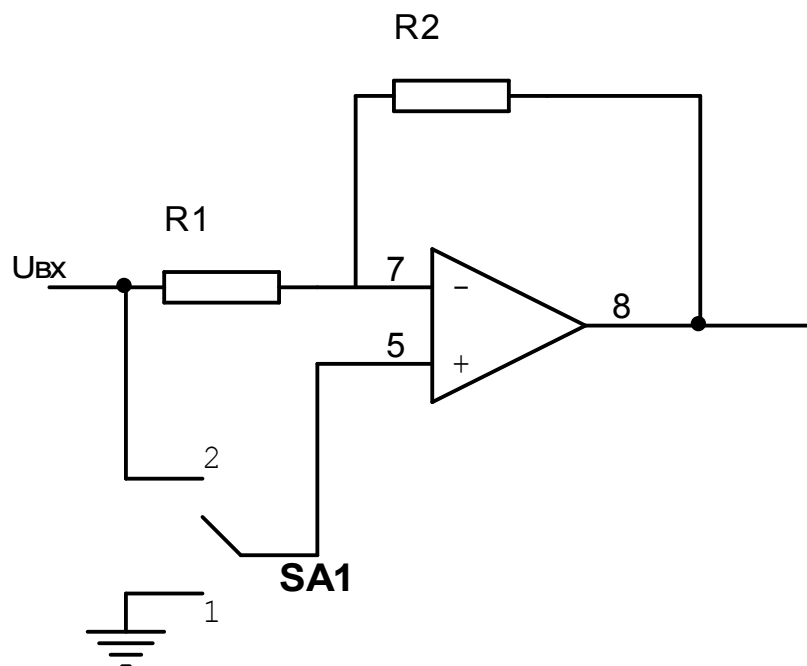


Постоянное напряжение в т. «а» называется **опорным**. В данной схеме $U_{\text{опорное}} = \frac{E_{\text{num}}}{2}$, т.е. в т. «а» создано состояние квазиземли и относительно этой точки один физический источник питания «+E_{пит}» - квазиразделился на «+» часть « $\frac{E_{\text{num}}}{2}$ » и «-» часть « $-\frac{E_{\text{num}}}{2}$ ».



Контуры C_1 , C_2 фильтруют постоянный ток, C_2 – обеспечивает $K_y = 1 + \frac{R_2}{R_1}$ ($R_1 \rightarrow \infty$) на постоянном токе = 1.

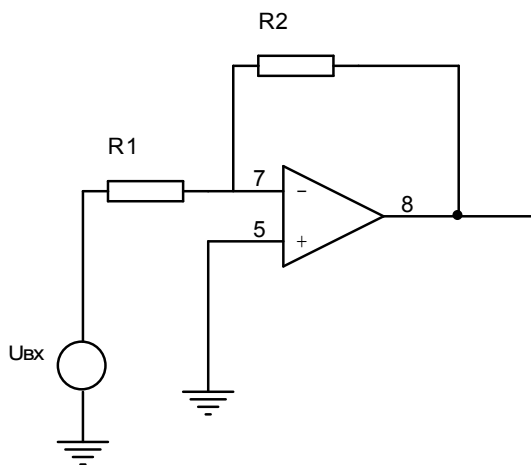
Управляемый инвертор. (инвентирует сигнал)



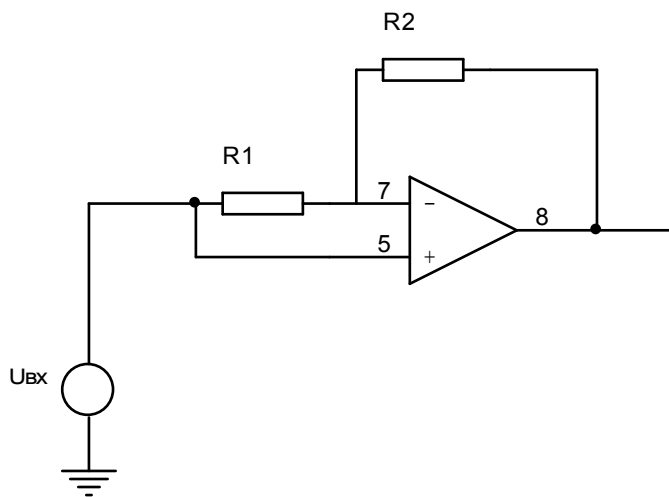
Часто важно получать инверсный или прямой сигнал по желанию.

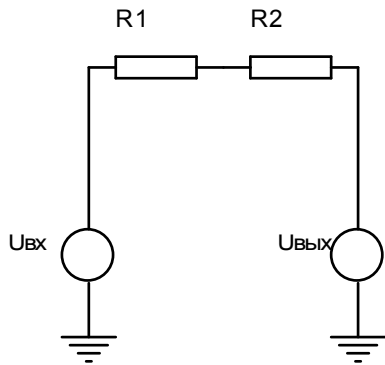
В 1-ом положении «+» на землю, во 2-ом на $U_{вх}$.

Первое положение



Второе положение





$$U_a = U_{\text{вых}} \frac{R_1}{R_1 + R_2} + U_{\text{вх}} \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 0$$

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

Параметры реального ОУ.

1. Коэффициент усиления по направлению – отношение изменения $U_{\text{вых}}$ к вызвавшему его изменению входного напряжения.

В общем случае к-т усил. ОУ, не охвач-го обратной связью равен произведению КУ всех каскадов.

Реальный КУ уменьшается с ростом частоты входного сигнала, суммарная АЧХ имеет столько изломов, сколько усилител-х каскадов в ОУ.

Каждый каскад на ВЧ вносит фазовый сдвиг равен ϕ , который влияет на устойчивую работу ОУ, несмотря на наличие ООС.

Устойчивую работу усил-х каскадов на ОУ обеспечивает введение внешней частотной коррекции – внешних нагрузочных RC-цепей.

Для стабилизации 2-х каскадного ОУ требуется 1 RC-цепь; 3-х каскадного – 2 RC-цепи.

Существует ОУ, не требующее внешних цепей коррекции. Они (RC-цепи) выполняются в едином технологическом цикле.

2. Частота единичного усиления ОУ – (f_1) - значение частоты входного сигнала, при котором значение Ки падает до 1.

Данный параметр определяет максимально реализуемую полосу усиления ОУ.

3. Максимальное выходное усиление – ($U_{\text{вых max}}$) – максимальное значение $U_{\text{вых}}$, при котором искажения не превышают заданного значения

$U_{\text{вых}}$ измеряется при определенном $R_{\text{нагр}} \Rightarrow$ при $\downarrow R_{\text{нагр}}$, $U_{\text{вых}} \downarrow$.

4. Скорость нарастания $U_{\text{вых}}$ – ($V_{u \text{ вых max}}$ или $u_{u \text{ вых max}}$) – отношение изменения $U_{\text{вых}}$ от 10% до 30% от своего номинального значения ко времени, за которое произошло это изменение.

Данный параметр характеризует скорость отклика ОУ на ступенчатое изменение сигнала на входе.

При измерении данного параметра ОУ охвачен ООС. Который обеспечивает Ки от 1 до 100.

5. Напряжения смещения - ($U_{\text{см}}$) – значение напряжения, которое необходимо подать на вход ОУ, чтобы напряжение на входе равнялось 0.

6. Входные токи – ($I_{вх}$) – токи, протекающие через входные контакты ОУ.

Появление этих токов обусловлено наличием базовых токов входных транзисторов (биполярных) или токами утечки затворов (полевых транзисторов).

7. Разность входных токов – ($\Delta I_{вх}$) – входные токи могут отличаться друг от друга на 10%, 20%, несмотря на то, что транзисторы выполнены в едином технологическом цикле.

8. Дрейф напряжения смещения от температуры – ($\Delta U_{см}$) – зависит от температуры и частично от времени.

9. Дрейф разности входных токов от температуры(времени) – ($\Delta I_{вх}$).

10. Максимум $U_{вх}$ – ($\equiv U_{вх \text{ диф}}$) – это напряжение, прикладываемое между входными выводами ОУ, превышение которого ведёт к выходу параметров за установленные границы или к разрушению прибора.

11. Максимальное синфазное входное напряжение – ($U_{вх \text{ сф}}$) – наибольшее значение напряжения прикладываемого одновременно к обоим входным выводам ОУ относительно «0»-го потенциала, превышение которого приводит к разрушению прибора.

12. Коэффициент ослабления синфазного сигнала – ($K_{ос \text{ сф}}$) – это отношение K_i , приложенного между входами ОУ, к коэффициенту усиления общего для обоих входов напряжения.

13. Выходной ток – ($I_{вых}$) – максимальное значение выходного тока ОУ, при котором гарантируется работоспособность.

Это значение определяет минимальное $R_{нагр}$.

При переходных процессах (включения, выключения) значения емкостной или индукционной нагрузки резко изменяются и в некоторых случаях возможен выход прибора из строя.

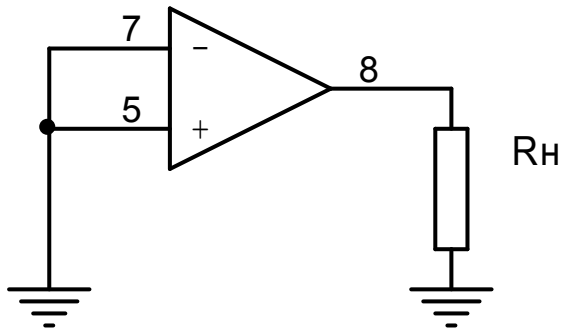
Часто вместо значения $I_{вых}$ в документации на ОУ приводят минимальные значения $R_{нагр}$.

Современные ОУ имеют специальный каскад защиты от короткого замыкания. Его нормальная работоспособность, когда $I_{кз} < 25 \text{ mA}$.

Компенсация сдвигов.

Т.к. ОУ состоит из множества линейных и нелинейных элементов, то практически невозможно получить для всех ОУ в партии $U_{вых}=0$ при $U_{вх}=0$. Почти всегда есть некоторое значение смещения $U_{вых}$.

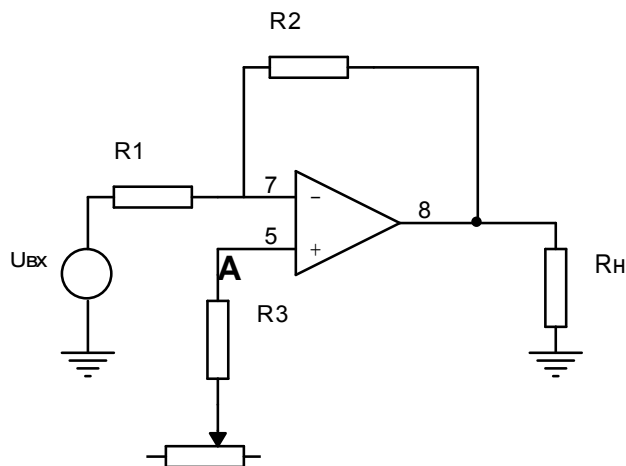
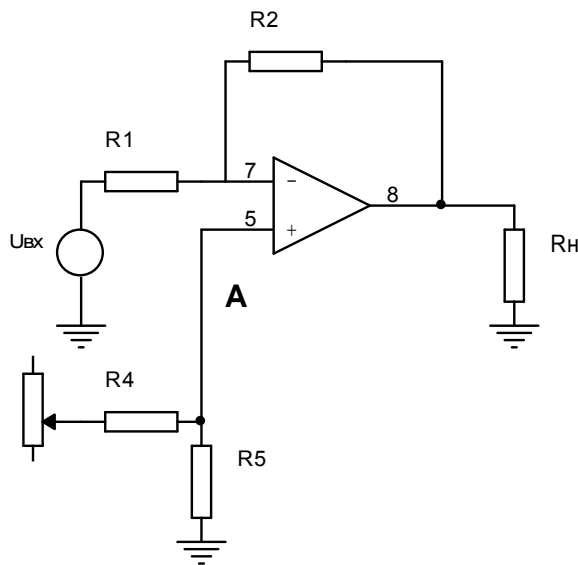
1. Входное напряжение сдвигов – это напряжение. Которое надо приложить к выходу, чтобы $U_{вых \text{ сдв}}=0$.



Когда $U_{\text{вых сдв}} = 0$, то говорят, что ОУ **сбалансирован**, а сам процесс – **балансировка**.

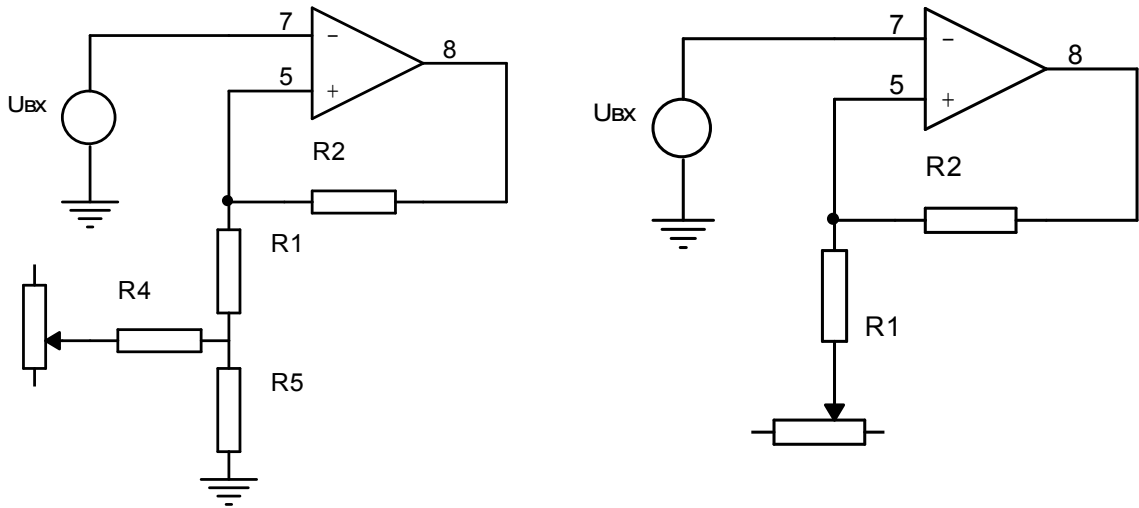
Приёмы балансировки.

Для инвертированного ОУ:

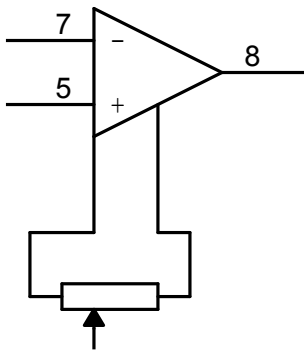


Фактически, в т.А создаётся некоторое опорное напряжение (квазиземля для ОУ), полярность и значения которой определяет балансировка ОУ.

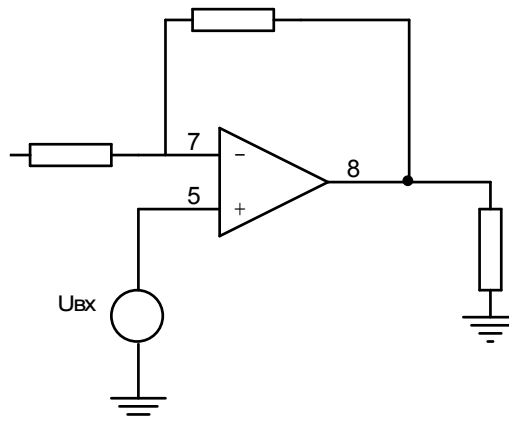
Для неинвертированного ОУ:



Некоторые ОУ имеют специальные выводы коррекции «нуля» (подстройки «нуля»).



Эквивалентная схема несбалансированного ОУ:



$$U_{\text{вых сдв}} = K_{\text{и}} * U_{\text{вх сдв}}$$

Всегда можно реально оценить значение $U_{\text{вых сдв}}$, т.к. $K_{\text{и}}$ – известен (для конкретной схемы), а $U_{\text{вх сдв}}$ – берется из справочника.

После этого можно принять решение: необходимо ли балансировать ОУ.

Пример: 140 УД6.

$$U_{\text{ВХ СДВ}} \equiv U_{\text{СМ}}; \text{ для } U_{\text{СМ}} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ В}$$

$$\text{Пусть схема имеет } K_{\text{и}} = 1000 \text{ и } U_{\text{ВЫХ СДВ}} \equiv U_{\text{ВЫХ СМЕЩ}} = 10^3 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 5 \text{ В}$$

=> схему надо балансировать (т.к. $K_{\text{и}} = 1000$) т.е. при использовании худших, с точки зрения $U_{\text{СМЕЩ}}$, экземпляров серии 140УД6 $U_{\text{ВЫХ СДВ}}$ не превысит 5В для заданной схемы. 5 В (при $K_{\text{и}} 1000$).

В заключении принимается решение о балансировке или нет, в зависимости от требования схемы.

2. Входной ток смещения

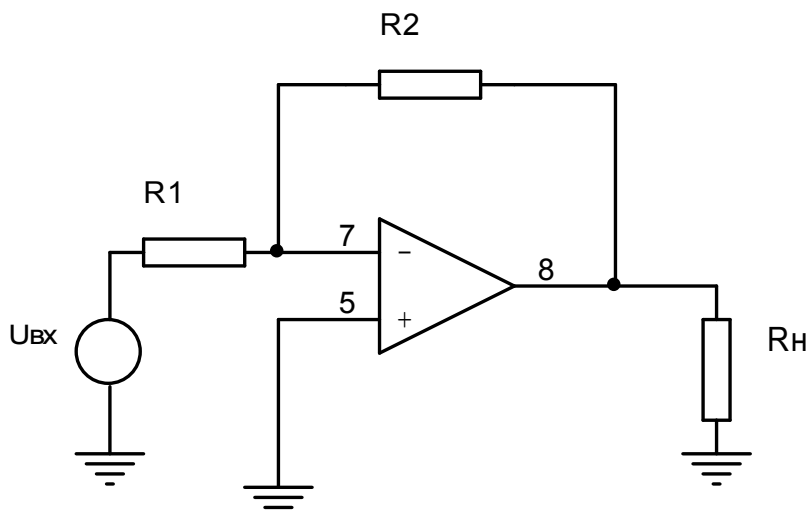
ОУ имеют на входе транзисторы => необходим некоторый ток, чтобы управлять транзисторами.

$$I_{\text{ВХ СМЕЩ}} = \frac{I_{\delta 1}}{I_{\delta 2}}$$

Т.к. транзисторы сделаны в одном технологическом цикле, то $I_{\delta 1} \sim I_{\delta 2} \sim I_{\text{ВХ СМЕЩ}}$.

Величина $I_{\text{ВХ СМЕЩ}}$ для разных серий ОУ колеблется от $10^{-14} \div 10^{-7}$.

Влияние этого тока особенно ощущается в случае применения в цепи ОС резисторов с большим количеством сопротивления.



При больших токах:

$$U^* = I_{\delta 1} \cdot (R_1 + R_2)$$

$U^* \equiv U_{\text{ВХ ДИФ}}$ для ОУ, которое впоследствии будет усилено самим ОУ.

$$U^* \equiv U_{\text{ВЫХ СДВ}} \approx R_2 \cdot I_{\delta 1}; R_2 - \text{сопротивление обратной связи; } R_2 > R_1.$$

Если взять I_{δ} из справочника, то можно найти $U_{\text{ВЫХ СДВ}}$.

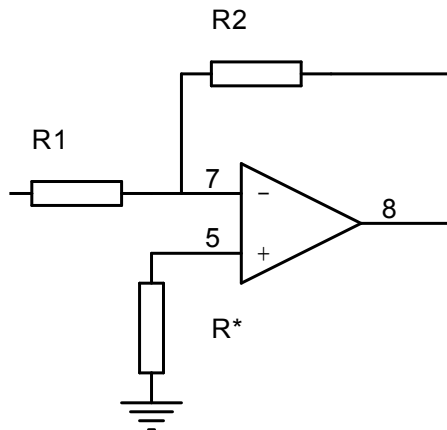
Пример: 140 УД7 (Э41)

$$R_2 = 100 \text{ КОМ}; I_{\delta \text{ справочное}} = 200 \text{ нА} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ А}$$

$$U_{\text{ВЫХ СДВ}} = 10^5 \cdot 2 \cdot 10^{-7} = 0,02 \text{ В}$$

Худшие экземпляры 140 УД7 в схеме I_{δ} могут вызвать сдвиг напряжения на 0,02 В.

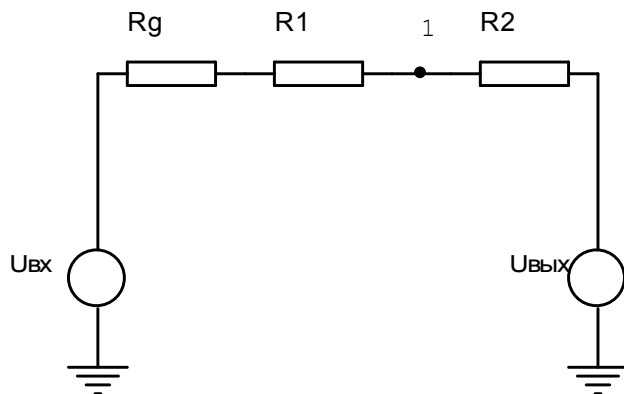
Влияние I_6 можно свести к минимуму введение дополнительного резистора R^* .



Номинал R^* выбирают из условия: Если $I_{61}=I_{62}$ и равны сопротивления которые оказывает схема этим токам, то будут и равны напряжения на входах 1,2 относительно земли.

R^* должно быть равно параллельному соединению $R_1 \parallel R_2$.

Если рассмотрим эквивалентную схему с выходным генератором:



$$U_1 = U_2$$

$$R^* = (r_d + R_1) \parallel R_2 = \frac{(r_d + R_1) \cdot R_2}{R_1 + R_2 + r_d}$$

$$\text{Если } r_d \text{ мало } (r_d \rightarrow 0), \text{ то } R^* = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{10^5 \cdot 10^6}{11 \cdot 10^5} \approx 91 \cdot 10^3.$$

Совместное влияние $U_{\text{вх сдв}}$ и $I_{\text{вх сдв}}$.

В схемах на ОУ $U_{\text{вх сдв}}$ может вызывать $U_{\text{вых сдв}}$, как положительной, так и отрицательной полярности. Аналогично ведет себя и $I_{\text{вх сдв}}$.

=> совместное влияние $U_{\text{вх сдв}}$ и $I_{\text{вх сдв}}$ может как ослаблять, так и усиливать друг друга.

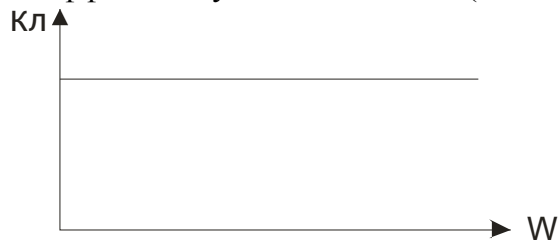
В худшем для разработки случае $U_{\text{вых сдв}}$ равняется алгебраической сумме этих влияний ($U_{\text{вх сдв}} + I_{\text{вх сдв}}$).

$$U_{\text{вых сдв}} \cong K_{\text{и}} * U_{\text{вх сдв}} + R_2 * I_{\text{вх сдв}}$$

При разработке схем необходимо учитывать суммарный $U_{\text{вых сдв}}$ и делать заключение о необходимости борьбы с ним.

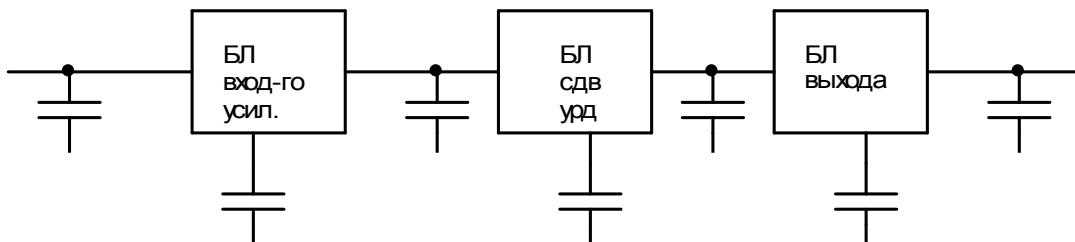
Амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики

Коэффициент усиления $OU = \infty$ (в идеале) во всем диапазоне частот.



Но в реальном случае ограничения на АЧХ накладывает влияние 2 процесса:

1. В реальном ОУ большое влияние оказывают внутренние емкости (конденсаторы), особенно на высоких частотах или близких к ним.

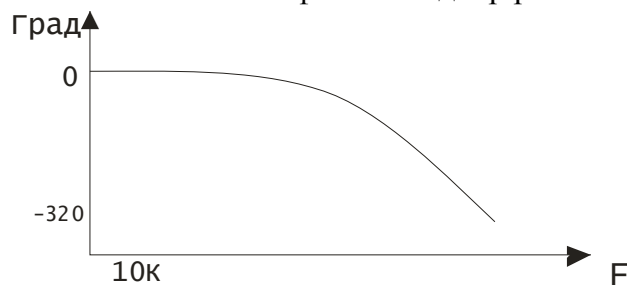


Т.к. реак-ое сопротивление конденсатора понижается с возрастанием ω (частоты) $\Rightarrow$ K_i – падает с повышением ω .

На высоких частотах K_i – теряется.

2. На высоких частотах или по мере приближения к ним увеличивается фазовый сдвиг выходного сигнала относительно входного.

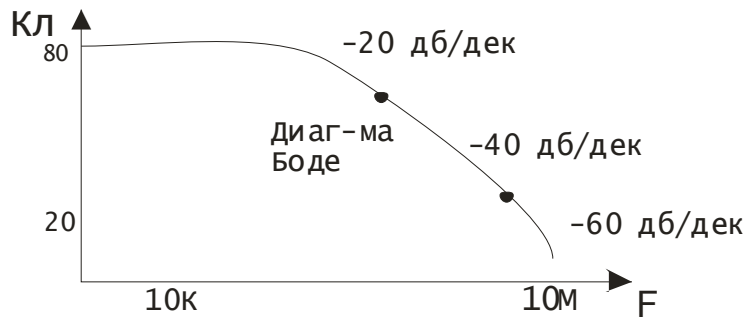
На низких частотах фазовый сдвиг равняется 180° , т.к. действует ООС.



На высоких частотах появляется запаздывание выходного сигнала $> 180^\circ$, это дополнительное запаздывание – **фазовый сдвиг** при работе с ООС.

Аппроксимация АЧХ линейными отрезками – диаграмма Боре.

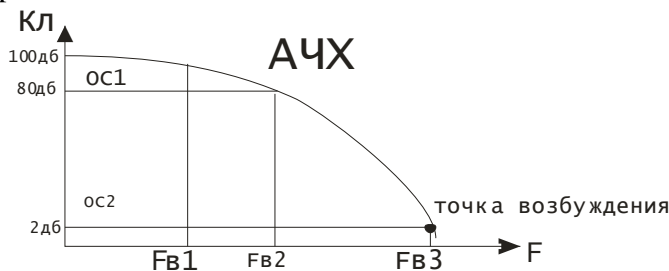
АЧХ и её аппроксимация.



В области -40 дБ/дек фазовый сдвиг настолько велик, что выходной и входной сигнал $\approx$ совпадают по фазе.

При введении глубокой ОС в этой области, она из ООС становится ПОС (положительной ОС). Схема становится способной к самовозбуждению.

В общем случае чтобы этого не происходило: наклон не должен существенно превышать -20 дБ/дек $\equiv -6$ дБ/окт



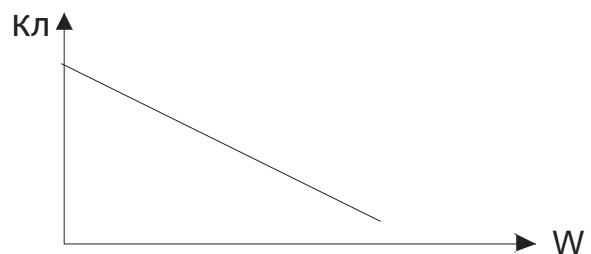
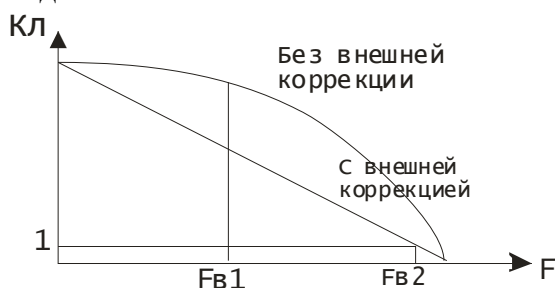
Увеличение глубины ОС увеличивает полосу пропускания ОУ (чем глубже ОС, тем Проп. шире).

Замечание: при введении ОС нужно учитывать, что схема в области ВЧ – нестабильна и склонна к генерации, если глубина ОС – высока, а спад у АЧХ > -20 дБ/дек.

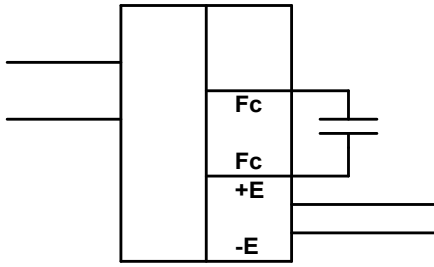
При ОС₁ схема – более стабильна, чем при ОС₂.

Несмотря на то, что в случае ОС₂ пол. проп. $>$, чем в случае ОС₁, при работе с ОС₂ нужно проявлять осторожность в области высоких гранич-х частот, т.к. возможно возбуждение.

Для того, чтобы этого избежать (самовозбуждения) в ОУ вводят специальные выводы для подключения внешних цепей коррекции. Это делают для того, чтобы с помощью дискретных элементов сгладить спад характеристики до уровня -20 дБ/дек $\equiv -6$ дБ/окт.

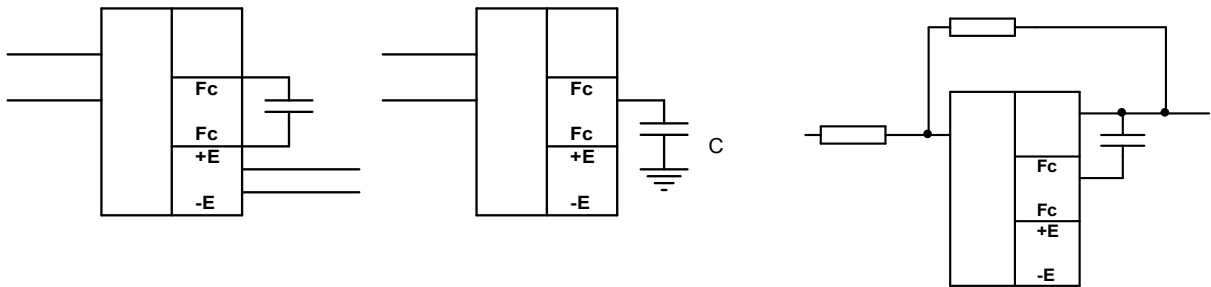


Для каждой конкретной схемы принимают решение о целесообразности использования той или иной кор-ии и о значениях номиналов корректирующих элементов.

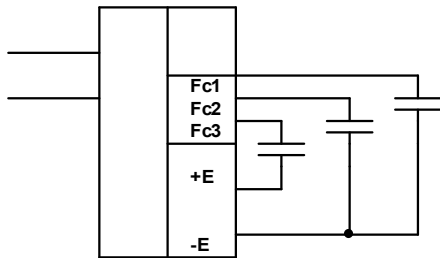


Метод подключения кор-го конденсатора (резистора) берут из справочника, где есть рис-к. типового включения.

Возможные схемы.

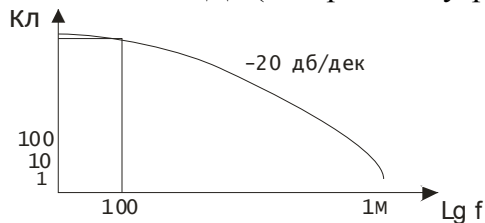


Чем больше внутри каскадов тем больше корректировочных конденсаторов



ОУ с внутренними цепями коррекции.

Промышленность выпускает ОУ с внутренними цепями коррекции. Если нет необходимости одновременно получать широк. пол. пронус. и высокий Ки применяют такие ОУ 140 УД7 (содержит внутренние цепи коррекции).



Внутри ОУ есть корректированные конденсаторы с емкостью 30 пФ сделанный в едином технологическом цикле.

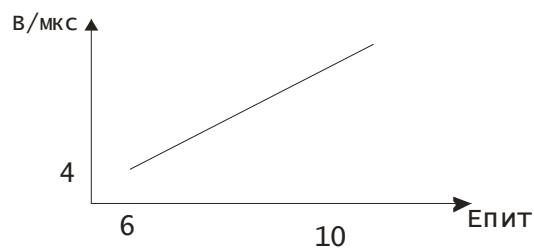
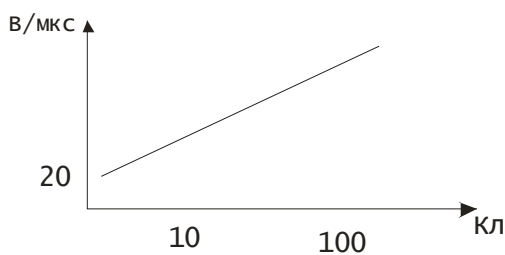
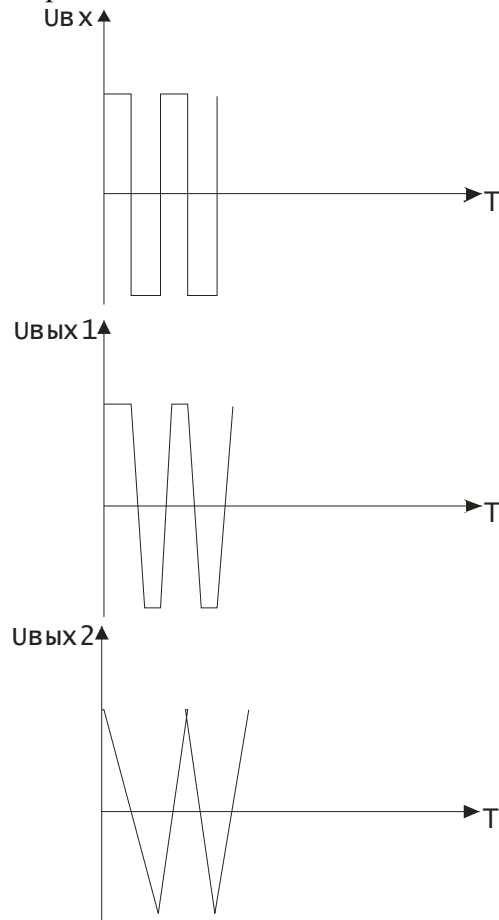
При $K_i=10^4$ (или 80 дБ) пол. проп.: 0÷100 Гц
 $K_i=1$ пол. проп.: 0÷1 МГц

Скорость нарастания выходного сигнала –

ответ на скачок входного сигнала.

Типовое значение: от $0,1 \div 100$ В/мкс (1000 В/мкс).

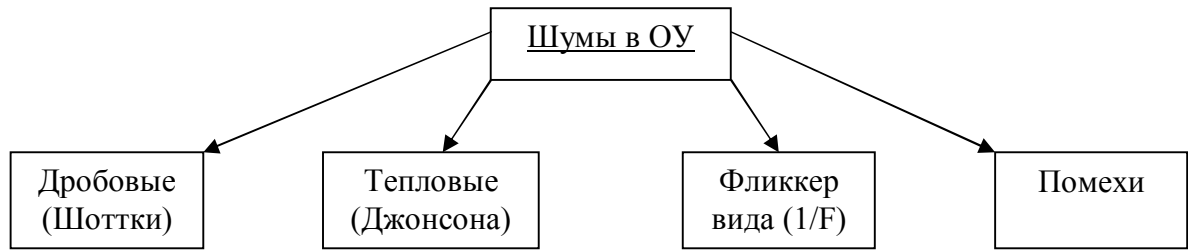
Недостаточность значения скорости нарастания особенно сказывается на усилении негармоничных сигналов.



Шумы.

Любой нежелательный сигнал смешивается с полезным сигналом представляет собой шум.

Шум – случайное значение переменного напряжения и тока, генерирующего в П-ак и П/П-ак.



Эффективное значение оценивается по формуле:

$$U_{шум} = \sqrt{4kTR(\Pi\Pi)}$$

k – постоянная Больцмана = $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/с

T – кельвин

R – сопротивление проводника

$(\Pi\Pi)$ – полос. пропус. (в Гц)

При увеличении температуры или сопротивления или $\Pi\Pi$ (пол. проп.) эффективное напряжение шума увеличивается.

Дробовые: В П/П невозможно задать постоянный ток с заданным средним значением, т.к. будут иметь место случайные отклонения тока.

Генерируемые т.о. сигналы – **дробовые шумы**.

$$I_{ш1} = \sqrt{2qI(\Pi\Pi)}$$

$q = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл

I – среднее значение тока в П/П-ке.

При увеличении I или $(\Pi\Pi)$ дробовые шумы увеличиваются.

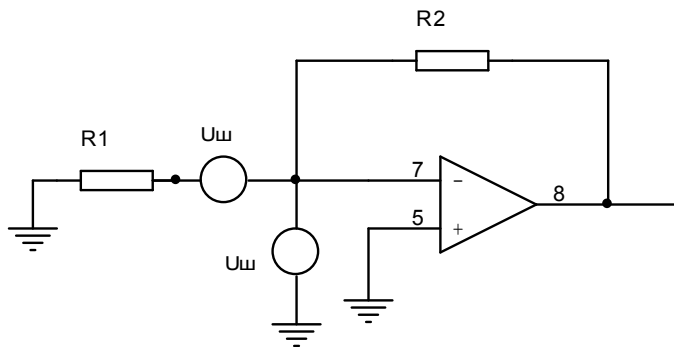
Фликкер-шум – зависит от частоты.

Низкочастотный шум вида 1/F:

С увеличением частоты- пропадает (проявляется на низких частотах).

Связан с флуктуациями решетки.

ОУ содержит большое количество разных элементов. Поэтому используют понятие **эквивалентный входной шум**.



В пасп-х данных ОУ-ей приводятся следующие параметры:

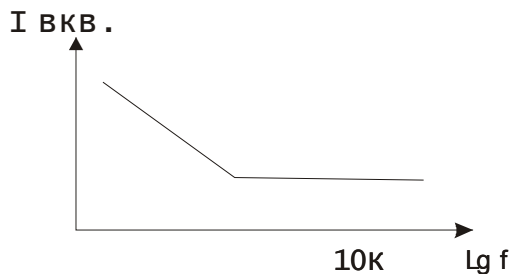
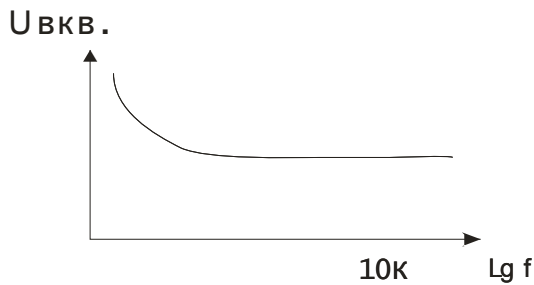
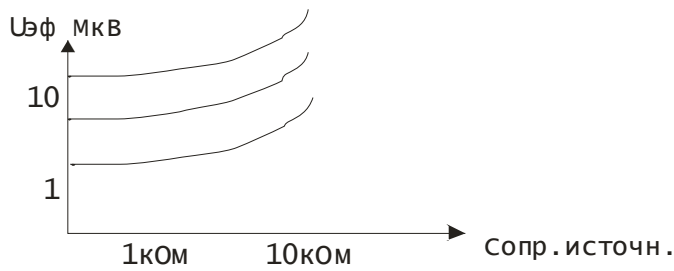
$U_{ш}^2$ – среднеквадратичное значение входного напряжения шума.

$I_{ш}^2$ – среднеквадратичный ток шумов.

$$U_{ш\text{ вх}}^2 = U_{ш}^2 + (R_2 \cdot I_{ш})^2$$

$R_2 > R_1$, учит. R_2 – сопротивление ОС. $R_2 = R_{ОС}$.

$$U_{ш\text{ вых}} \approx Ku \sqrt{U_{ш}^2 + (R_2 \cdot I_{ш})^2}$$



Помехи – паразитные наводки или сигналы, мешающие качественной обработке основного (информационного) сигнала.

Основные источники помех:

1. Бытовая электросеть (СНГ – 50 Гц, США – 60 Гц).
2. Бытовые электроприборы.
3. Военное оборудование.
4. Всевозможные электрические моторы (троллейбусы, станки...).
5. Теле-радио станции.
6. Автомобили.
7. Космический шум.

Основной метод борьбы – экранирование.

Отношение сигнал/шум $\equiv$ с/ш и коэффициент шума.

При одновременном действии 2-х шумовых сигналов:

$$U_{ш\Sigma} = \sqrt{U_{ш1}^2 + U_{ш2}^2} \quad \text{Можно работать с модулями.}$$

Два шума складываются = складываются квадраты амплитуд.

$$U_{\Sigma} = \sqrt{U_{ш}^2 + U_{с}^2}$$

шум сигнал

$$\text{Сигнал/шум: } \text{с/ш} = 10 \cdot \lg\left(\frac{U_{с}^2}{U_{ш}^2}\right); \text{ с/ш} = [\text{Дб}].$$

В качестве направлений берут эффективное значение напряжений и при этом оговаривают полосу частот и центральную частоту.

Коэффициент шума – ($K_{ш}$) – отношение в Дб выходного сигнала реального усилителя к выходному сигналу идеально бесшумного усилителя с тем же коэффициентом усиления.

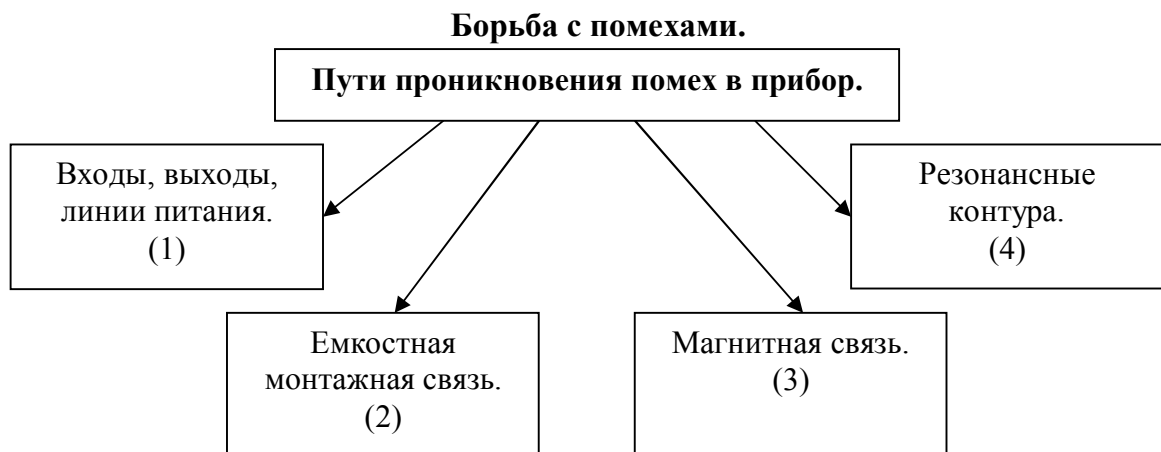
Входным сигналом в обоих случаях является шум резистора, подключенного ко входу усилителя.

$$K_{ш} = 10 \cdot \lg \left[\frac{4kTR_u + U_{ш}^2}{4kTR_u} \right] = 10 \cdot \lg \left(1 + \frac{U_{ш}^2}{4kTR_u} \right)$$

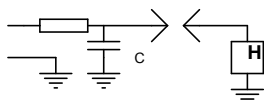
$U_{ш}^2$ – среднеквадратичное напряжение шума на Гц, даваемый усилителем бесшумным (холодным) резистором на входе.

$$c / ш = 10 \cdot \lg \left(\frac{U_c^2}{4kTR_u} \right) - K_{ш}$$

U_c^2 – среднеквадратичное напряжение сигнала.



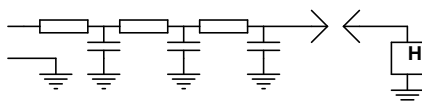
(1) При борьбе с шумами в цепи питания используют, в основном, RC-фильтры.



Чем меньше частота помехи, тем $T=R \cdot C$ – должно быть выше.

C (емкость) нельзя увеличить до бесконечности, а R – не может быть высока, т.к. наступает ограничение тока, отдаваемого в нагрузку.

Эффект направления можно усилить.



Фильтры позволяют добиться ослабления помех до 60 дб при частотах до 100 кГц.

Борьба с помехами на входе и выходе более важна, т.к. помехи также имеют такой же частотный спектр, как и основной сигнал.

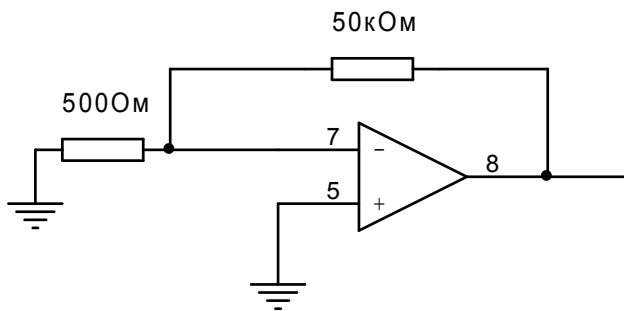
В УНЧ (усилитель низких частот) часто используют ФНЧ (фильтр низких частот) на входе и выходе, т.к. многие помехи попадают через входные и выходные провода, особенно через провода к громкоговорителю (колонки). Они играют роль антенн. Роль антенн также может выполнить и корпус.

Вывод: корпус и все входные и выходные провода, особенно с сигналами малой амплитуды, всегда должны быть экранированы.

(2) При небольшом расстоянии между дорожками, их можно рассматривать как физический конденсатор. А при современном стремлении к миниатюризации, $C_{эк} \sim 10$ пФ.

Методы борьбы:

- Увеличить расстояние между дорожками.
- Уменьшить длину дорожек (переставить местами компоненты).
- Максимально придвинуть длинные дорожки к шине заземления (дорожки заземления (параллельно) имеют свойство глотать помехи, особенно между двумя дорожками).
- Снизить собственное сопротивление дорожки, т.е. увеличить ее толщину.
- По возможности снизить полное сопротивление схем, подключением к этим малосигнальным дорожкам.



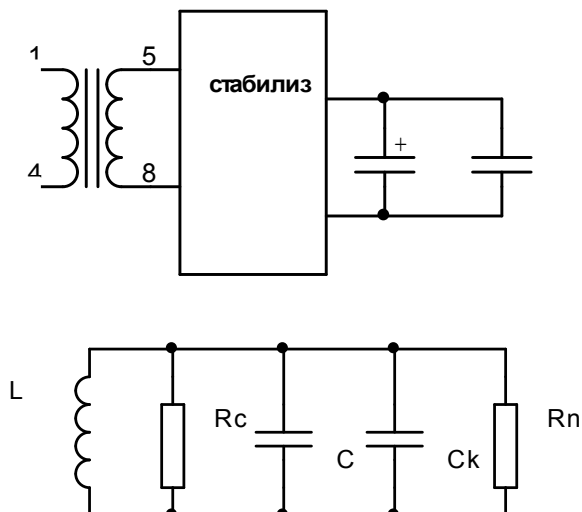
(3) Низкочастотные магнитные поля существенно ослабляются экранировкой.

Нужно в схеме избегать проводов или дорожек в виде петли, а также следить, чтобы замкнутый контур имел как можно меньшую площадь.

При работе с сигналами очень низкого уровня или устройствами, чувствительными к магнитным наводкам применяют магнитные экраны.

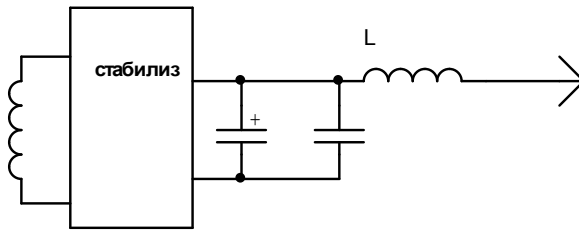
Часто уменьшение наводки добиваются заменой прямоугольного трансформатора на тороидальный. Он дает в несколько раз меньше наводимую помеху.

(4) Часть схемы может пред-ть мощный эквивалентный контур.



Возникают собственные колебания и схемы сами генерируют сигнал

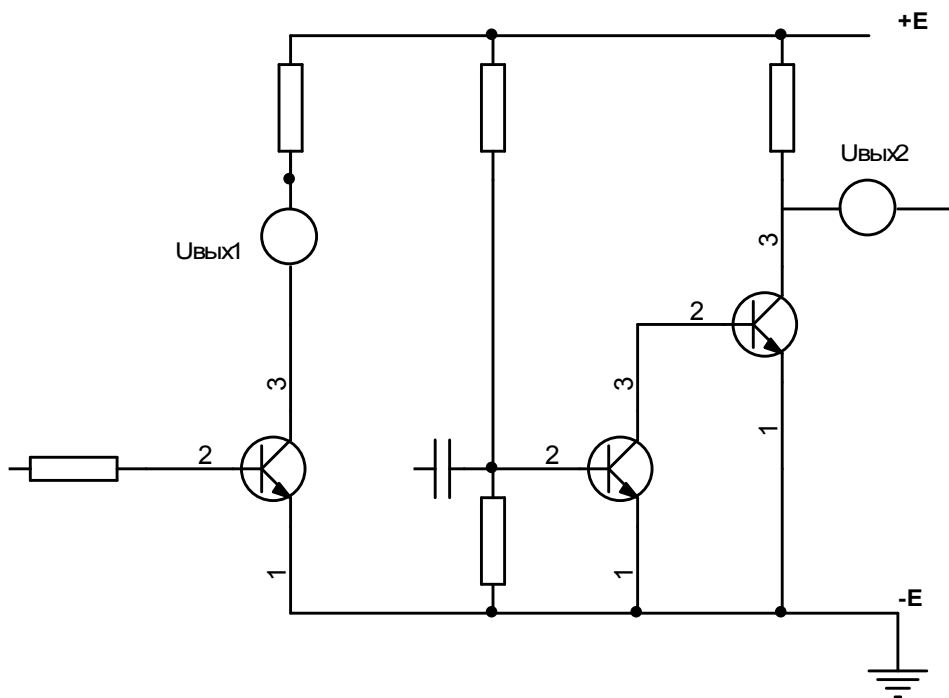
Устранить(избавиться от резонанса) это можно введением индуктивности



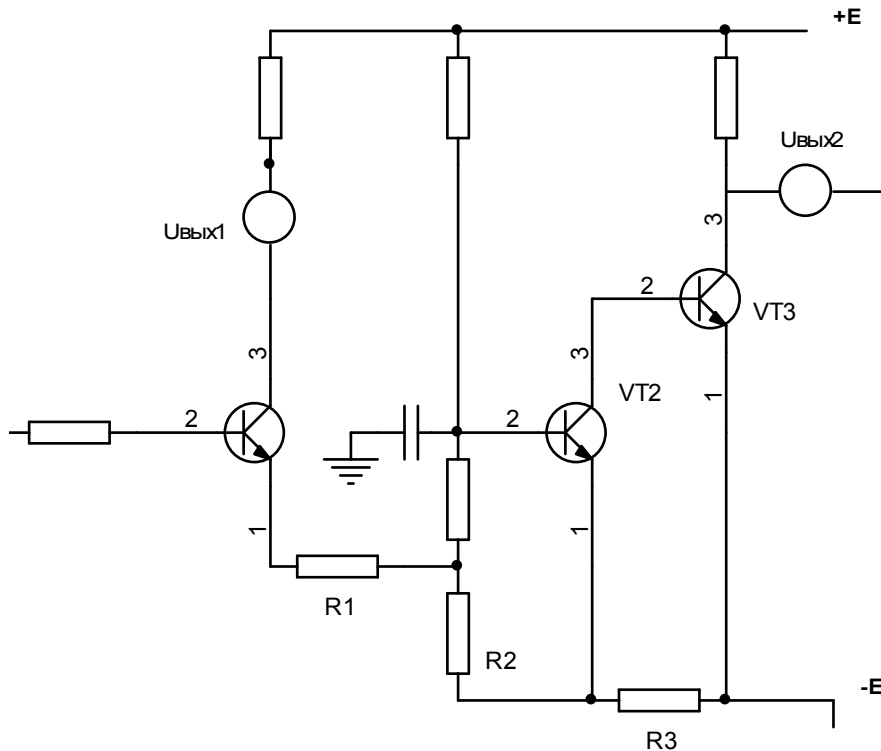
На постоянный сигнал L влияние не оказывает, но нарушает условия возникновения генерации.

Заземление.

Нужно помнить, что ток, протекающий по линии заземления, может поражать сигнал, который воспринимает другая часть схемы, подключаемая к этому же проводу заземления.



Представленная схема преобразуется:



Протекание тока через транзистор $VT1$ в 10 А наведет на низком сопротивлении r (0,2 Ом) напряжение в 2 В $\Rightarrow$ сместится рабочая точка транзисторов $VT2$, $VT3$ и весь каскад перейдет в режим насыщения.

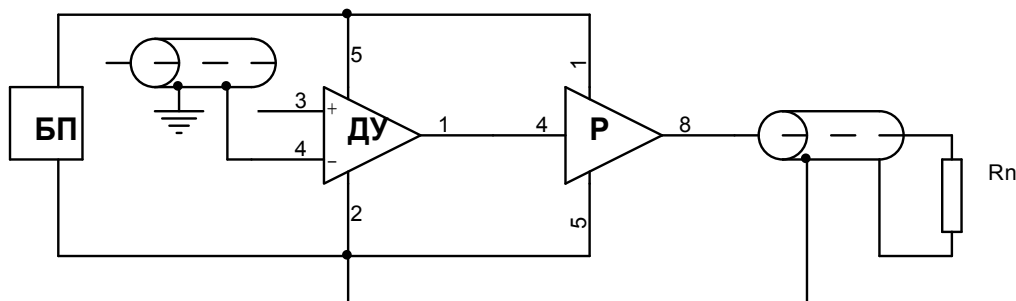
Если через $VT1$ пропустить даже небольшой переменный ток, то он, усиленный в $(B_{VT2} \cdot B_{VT3})$ раз появится на выходе схемы $U_{\text{вых 2}}$.

Что нужно делать?

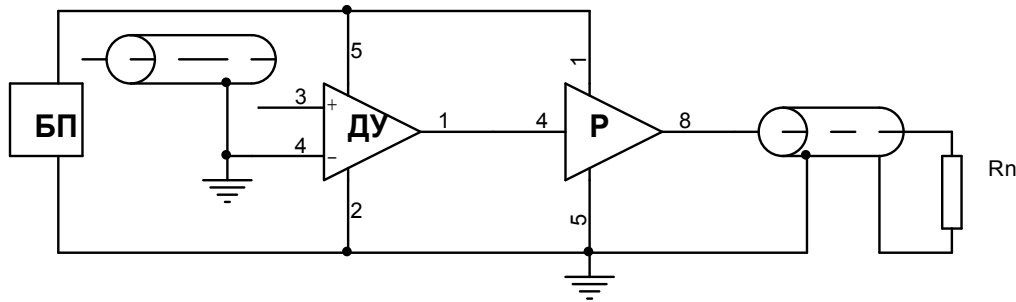
Чтобы этого не происходило, делают точку, в которой сходятся все линии заземления схемы.

Двух каскадный усилитель:

Правильная схема

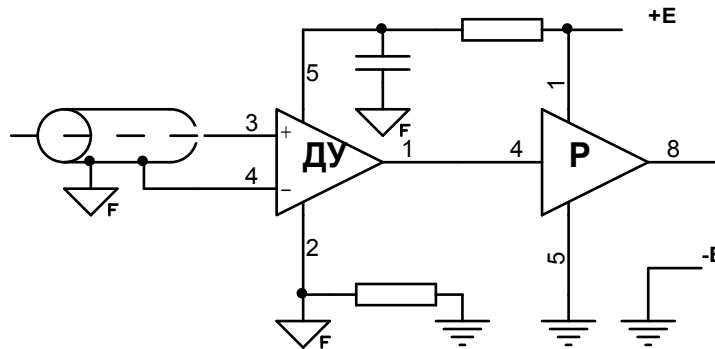


Неправильная схема

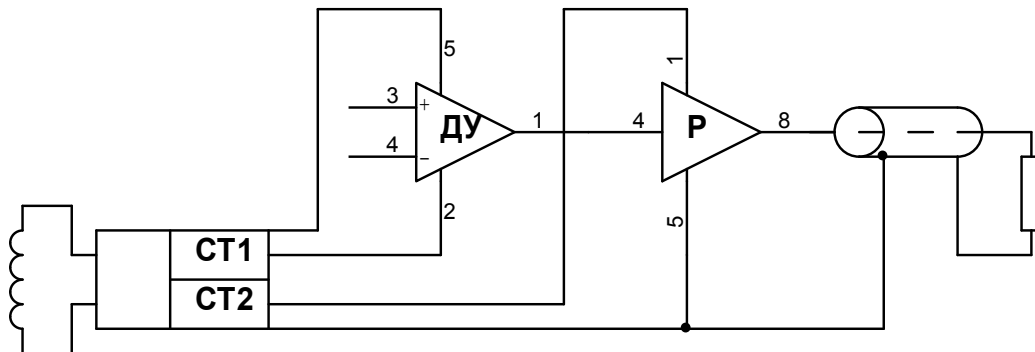


Здесь наведенный сигнал не убирается, а усиливается дальше ДУ.

Если требования жесткие, то делают отдельно две земли:



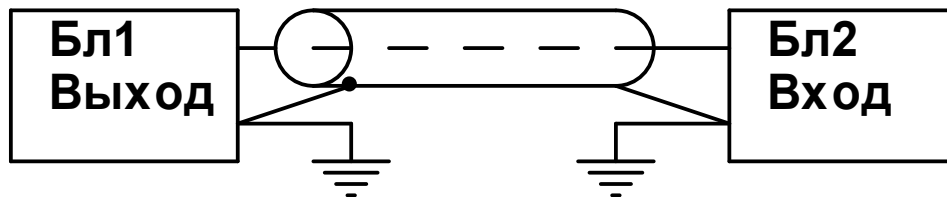
Если очень жесткие требования, то ставят два источника питания.



Необходимо следить, где протекают большие токи, чтобы вызываемые ими падения напряжения, не влияли на вход схемы.

Принципы построения заземления между различными приборами (схемами).

1. Если линии не длиннее 5-10 м и напряжение $U_{\text{сигнала}} > 2 \text{ В}$, то используют провода достаточно простой экранировки.
- 2.



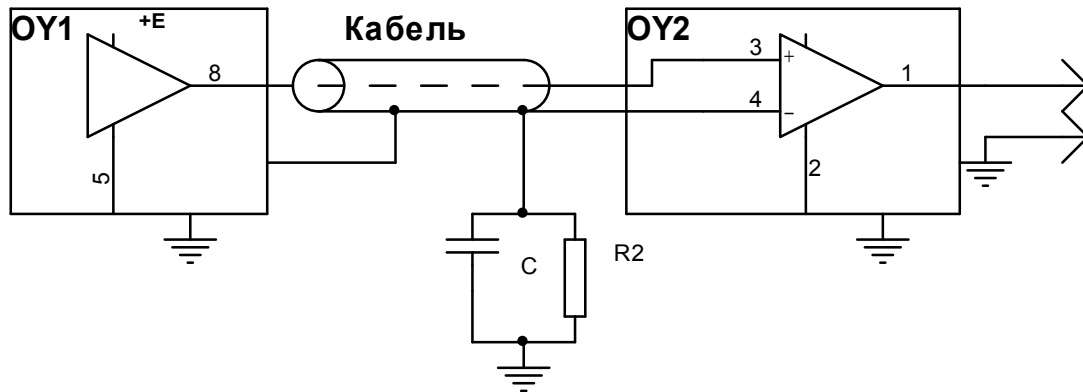
Для цифровых сигналов: допускается не использовать экранированные провода на расстоянии до 40 см.

$$U^1 > 3.2(3.5) \text{ В}$$

$$U^0 < 0.4(0.2) \text{ В}$$

2. Если уровень сигнала мал или длина линии – велика (более 20 м), то поступают так:

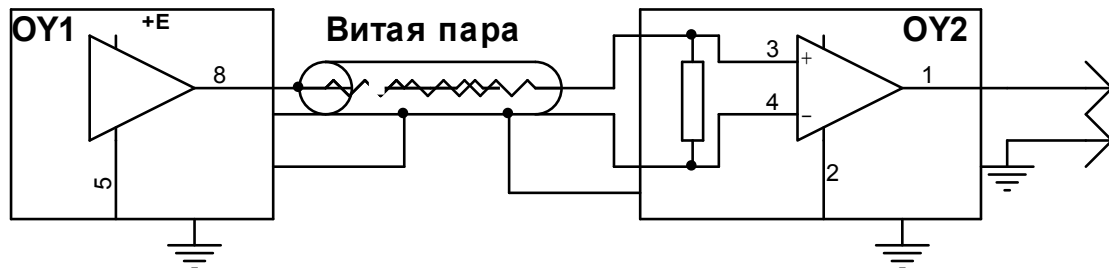
а) Используют согласованный коаксиальный провод (антенный провод телевизора, как пример: влияние собственной емкости компенсируется влиянием собственной индуктивности).



Цепь $C_1 R_1$ вводится для защиты входного каскадного пробоя, не дает появиться большому наведенному напряжению.

ОУ₂: выделяет из мощного синфазного сигнала дифференц-й.

б) **Экранированная витая пара.**

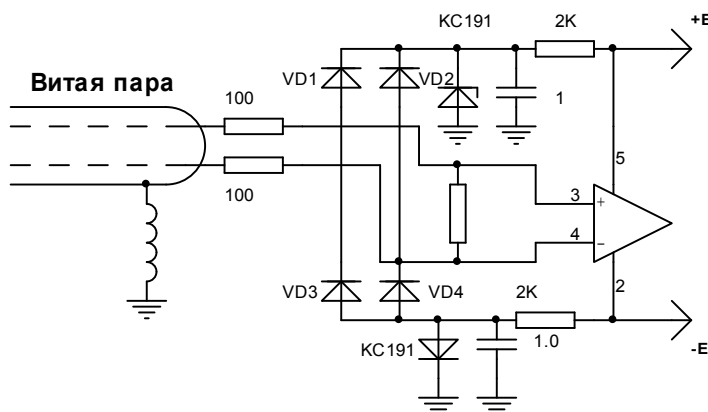


Земля и информационный сигнал поставлены в равные условия: они оба экранированы.

Достоинство: напряжение, наведенное на экране влияет на диф. усилитель ОУ₂.

Если используется цифровой передатчик, то на витую пару подают не землю, а инверсный сигнал. (повышает помехозащищенность).

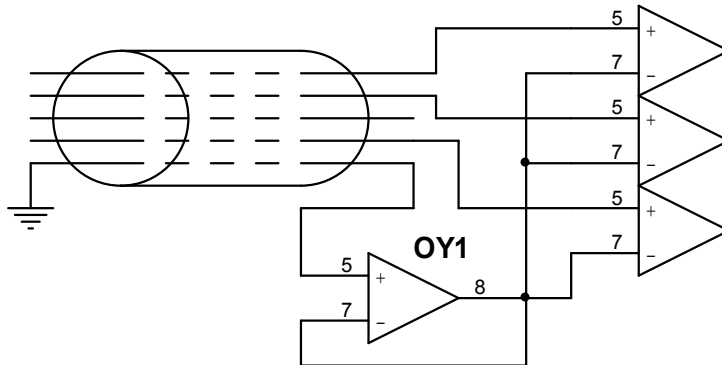
в) **Комплексный подход.**



Соединение защитных диодов VD1, VD4 и стабилизатора КС 191 позволяют ограничить входной сигнал ОУ до уровня 9,1 В (на стабилитроне) + 0,7 В (на диоде) = 9,8 В.

На входах ОУ не появится синфазное напряжение больше чем $\pm 9,8$ В.

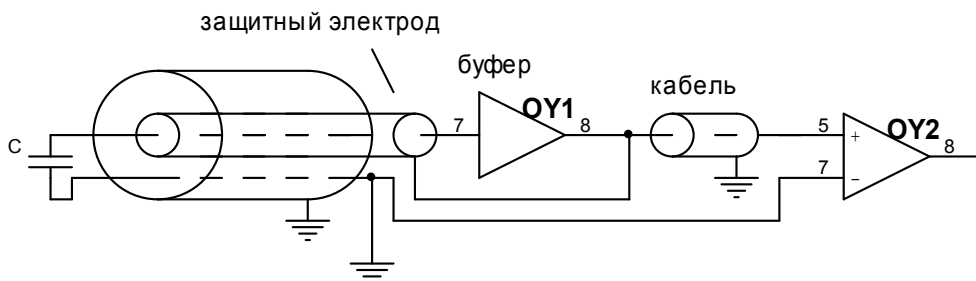
Для многожильных кабелей выделяют специальную жилу для компенсации синфазной помехи.



Для источников малого сигнала, имеющих большое собственное сопротивление $10^3 \div 10^{11}$ Ом, применяют специальное включение, обусловленное тем, что при емкости кабеля равного 1 пФ, $T=RC=10^{11} \cdot 10^{-12}=0.1$ (С), т.е. ограничение, связанное с RC наступает порядка $f=1/T \sim 10$ Гц, т.е. имеет фильтр НЧ со спадом порядка 10 Гц. К этому еще и добавляется влияние тока утечки сигнала по конечному значению сопротивления изоляции кабеля.

Это особенно важно при ОУ со сверхнизким $I_{вх} < 1$ нА.

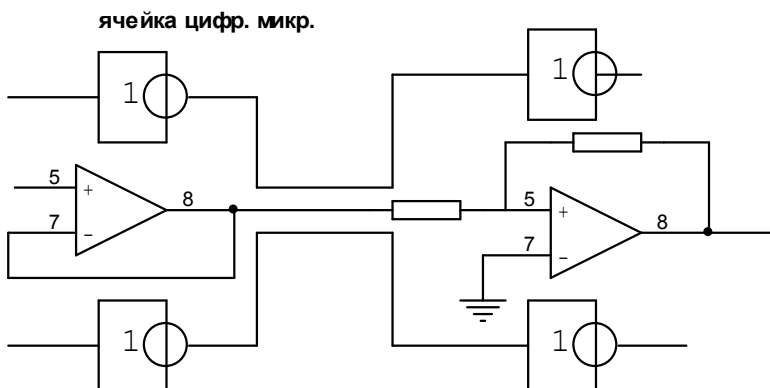
Как поступить?



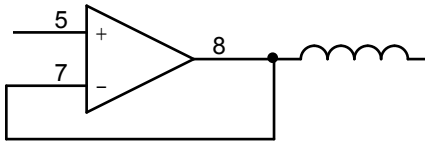
ОУ₁ может (должен) находится около кабеля, а ОУ₂ – на расстоянии.

Сигнал от ОУ₁ и ОУ₂ может идти по обыкновенному экранированному кабелю.

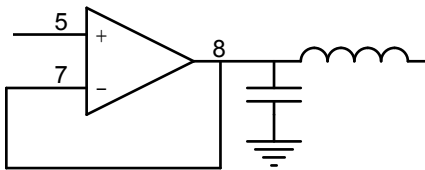
Примечание: Если ОУ используется на высоких частотах, то нужно учитывать:



При переключениях инверторов на слабом (менее 0,1 В) аналогичном сигнале будут проследиваться помехи игольчатого всегда. А если ОУ работает на ВЧ, то иголки примет за сигнал основной.



Чтобы не было иголок, вводят дополнительную емкость.



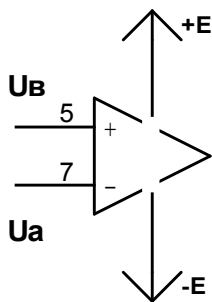
Напряжение в индуктивности и емкости ведут себя противоположно => введение небольшой емкости C_1 позволяет ослабить влияние наведенных высокочастотных сигналов (иголок), но нужно учитывать, что уменьшается максимальная скорость нарастания напряжения на выходе ($ОУ_2$), на входе ($ОУ_1$).

Использование ОУ для сравнения двух аналоговых сигналов.

Аналогичный компенсатор.

На практике часто нужно сравнить два сигнала: а и б или, что тоже самое, оценить, когда исследуемый сигнал достигнет определенного значения. Для этой цели используют ОУ, включ-й без цепей ООС.

В этом случае коэффициент усиления соответствует справочным данным (до 100000).



$$U_a > U_b$$

$$\text{Пр-но: } U_a - U_b = 1 \text{ мВ} \equiv U_{\text{вх диф}}$$

$$\text{При } K_i = 5 \cdot 10^4 \quad U_{\text{вх диф}} = 1 \text{ мВ}$$

$$U_{\text{вых расч}} = 10^{-3} \cdot 45 \cdot 10^4 = 50 \text{ В} \Rightarrow \text{ОУ уйдет в положительное насыщение.}$$

$$\text{Если } U_a < U_b$$

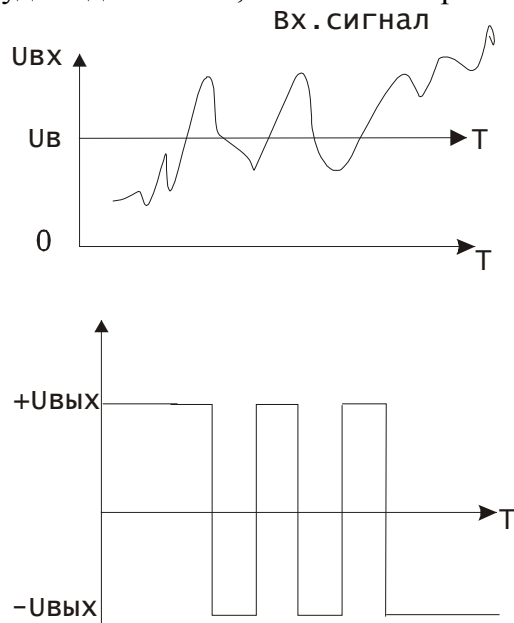
$$U_{\text{вых расч}} = -50 \text{ В} \Rightarrow \text{ОУ ийдет отрицательное насыщение.}$$

ОУ, включен. без ОС при превышении U_a над U_b даже на 1 мВ перейдет в режим положительного насыщения, т.е. на выходе будет «+» 15 В = $E_{\text{пит}}$.

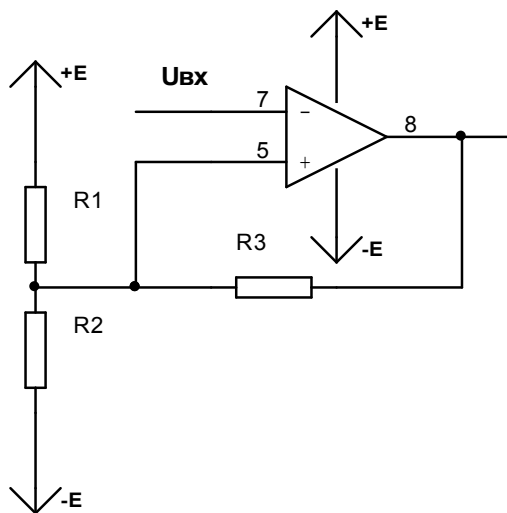
Если $U_a < U_b$, даже на 1 мВ, то ОУ уйдет в отрицательное насыщение, на входе – напряжение близкое к «-» 15 В = $E_{\text{пит}}$.

Проблемы:

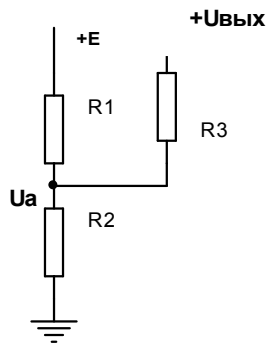
1. Если сигнал на входе в окрестности порогового переключателя будет изменяться медленно, то и выходной сигнал будет изменяться медленно.
2. Если на входе ОУ присутствуют шумы или помехи, то состояние на входе ОУ не будет однозначно, возможны переключения случайного вида.



Для устранения этих недостатков вводят пол-ую ОС (ПОС):



Введение ПОС существенно ускорило время переключения компаратора и обусловило появление двух порогов переключения.



Пусть ОУ в положительном насыщении.

$$i_{R2} = i_{R1} + i_{R3}$$

$$\frac{U_a}{R_2} = \frac{E_{\kappa} - U_a}{R_1} + \frac{U_{\text{вых}}^+ - U_a}{R_3}$$

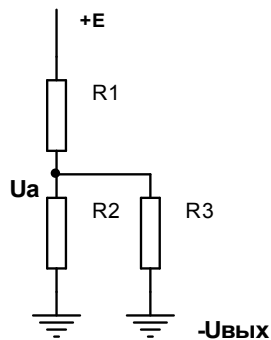
$$\frac{U_a}{R_2} = \frac{E_{\kappa}}{R_1} - \frac{U_a}{R_1} + \frac{U_{\text{вых}}^+}{R_3} - \frac{U_a}{R_3}$$

$$U_a \cdot \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} \right) = \frac{E_{\kappa}}{R_1} + \frac{U_{\text{вых}}^+}{R_3}$$

$$U_a = \frac{E_{\kappa} \cdot R_3 + U_{\text{вых}}^+ \cdot R_1}{R_1 \cdot R_3} \cdot \frac{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3}{R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_3 + R_2 \cdot R_3}$$

$$U_a = \frac{E_{\kappa} \cdot R_2 \cdot R_3 + U_{\text{вых}}^+ \cdot R_1 \cdot R_2}{R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_3 + R_2 \cdot R_3} \text{ - верхнее опорное напряжение.}$$

ОУ в отрицательном насыщении.



$$i_{R1} = i_{R2} + i_{R3}$$

$$\frac{E_{\kappa} - U_a}{R_1} = \frac{U_a}{R_2} + \frac{U_a - U_{\text{вых}}^-}{R_3}$$

$$\frac{E_{\kappa}}{R_1} - \frac{U_a}{R_1} = \frac{U_a}{R_2} + \frac{U_a}{R_3} - \frac{U_{\text{вых}}^-}{R_3}$$

$$U_a \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) = \frac{E_{\kappa}}{R_1} + \frac{U_{\text{вых}}^-}{R_3}$$

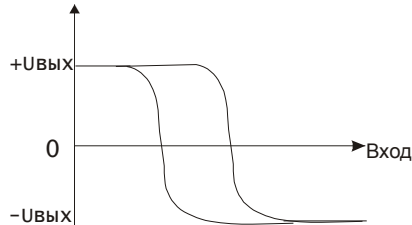
$$U_a = \frac{E_{\kappa} \cdot R_3 + U_{\text{вых}}^- \cdot R_1}{R_1 \cdot R_3} \cdot \frac{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3}{R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_3 + R_2 \cdot R_3}$$

$$U_a = \frac{E_k \cdot R_2 \cdot R_3 + U_{вых}^- \cdot R_1 \cdot R_2}{R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_2 + R_2 \cdot R_3} - \text{нижнее опорное сопротивление.}$$

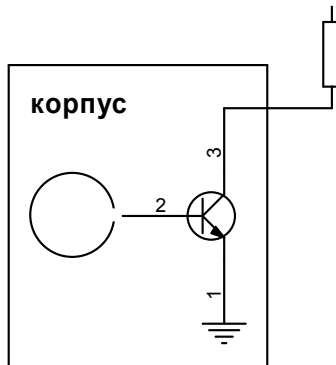
Результативная U_a – отличается сильно.

При введении R_{OC} появляется порога: верхний и нижний. Часто говорят про верхний – напряжение срабатывания, нижний – напряжение отпускания.

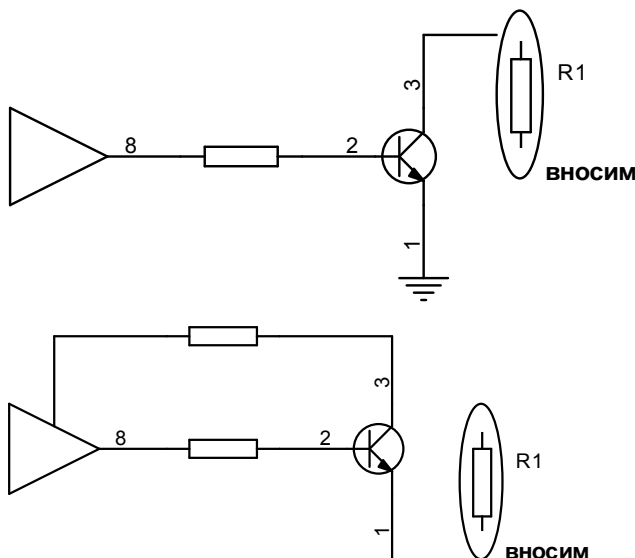
В результате срабатывание происходит по петле Гистерезиса: позволяет избежать ошибочных переключений вблизи $U_{опорного}$.



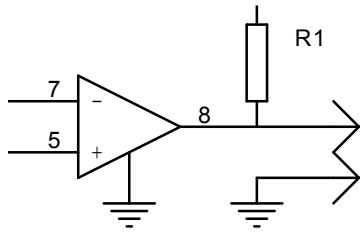
Промышленность выпускает специальные интегральные компараторы. Они отличаются наличием каскада сдвига уровня на выходе для привязки к цифровым схемам и имеют открытые кол-р и эмит-р на выходе.



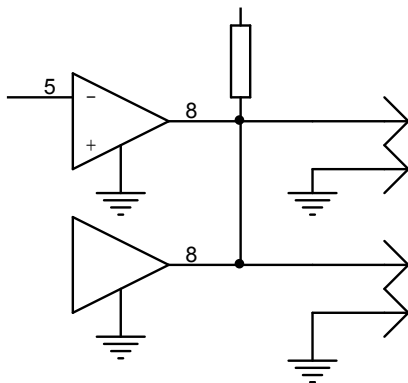
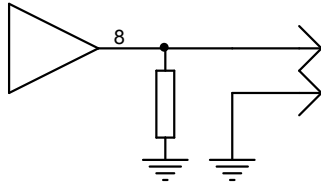
Вводится открытый кон-р:



Чтобы был ключ, вносится кол-ый резистор:



Если схема с ОЭ:



Достоинство: Легко организуется.

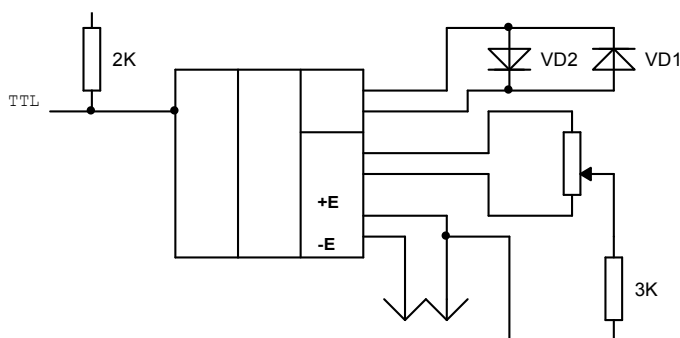
Основные характеристики аналоговых компараторов.

1. K_i до 500000
2. $U_{см}$ (2...10 мВ)
3. Скорость нарастания 50 В/мкс и больше.
4. $I_{вых}$ (0,1...100 мкА)

Компаратор работает на слабых токах. Если будут больше, то появляются паразитные емкости.

5. $U_{вых \text{ «0»}}$ (-1...0 В)
6. $U_{вых \text{ «1»}}$ (2,5...6...9 В)
7. $t_{зд} \text{ (задержки)} = 5 \div 3 \cdot 10^3 \text{ нс}$

Конкретную тепловую схему включения берут из справочника.



Диоды VD1, VD2 – ограниченные диоды (предохранительные) установлены с целью предотвратить пробой к входам компаратора, т.к. $U_{\text{вх диф}}$ обычного компаратора редко больше 5 В т.е. диоды выполняют защитную функцию. Когда сигнал большой, то они открываются и остаются «0,7 В» напряжении.

Схема №1

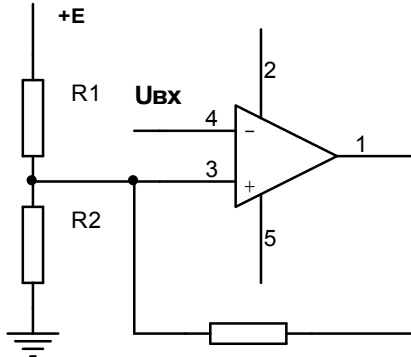
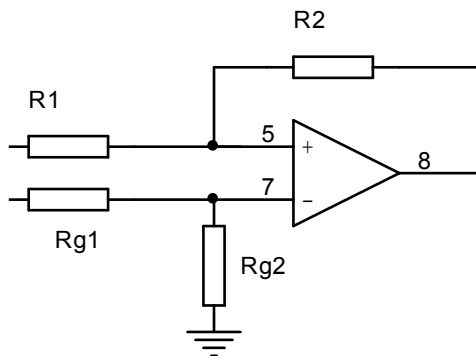


Схема №2



ПОС можно ввести в $U_{\text{вх}}$ и тогда.

Если в СХ 1 введение ПОС на R_3 разделяло $U_{\text{опор}}$ на два значения в зависимости от того, в каком состоянии находится ОУ, то в СХ 2 $U_{\text{опор}}$ не меняется от состояния ОУ.

В СХ 2 ОУ при переключении вырабатывает дополнительное напряжение, находящиеся в синфазе со входным, заставляя тем самым ОУ переключаться быстрее (подстегивает его).

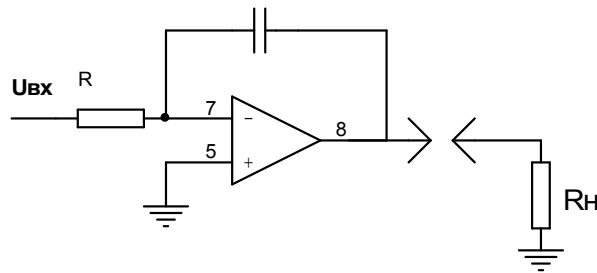
Некоторые компараторы имеют дополнительный вход **стробирования**. Сигнал строга – сигнал синхронизации.

Процесс синхронизации – процесс стробирования. Вход стробирования отключает выход компаратора, переводит в третье состояние.

Часто имеет место парофазный выход – имеется два выхода, работающих в противофазе (с точностью до наоборот повторяют друг друга).

Часто в одном корпусе содержится несколько компараторов (до 4 штук - независимых).

ОУ, выключенный по схеме интегратора.



В общем случае $U_a=0$ (т.к. положительный вход- заземлен и оп первому правилу).

Выход ОУ вырабатывает противофазный ток.

Напряжение на контуре равно $U_{\text{вх}}$.

$$U_R \equiv U_{\text{вх}} = IR \Rightarrow I = \frac{U_{\text{вх}}}{R} (*)$$

$$i_c = C \cdot \frac{dU_c}{dt}$$

$$U_c = \frac{1}{C} \cdot \int i_c dt$$

$$U_c \equiv U_{\text{вх}} = -\frac{1}{C} \cdot \int I dt (**)$$

$$U_{\text{вх}} = -\frac{1}{C} \cdot \int \frac{U_{\text{вх}}}{R} dt$$

$$U_{\text{вх}} = -\frac{1}{RC} \cdot \int U_{\text{вх}} dt$$

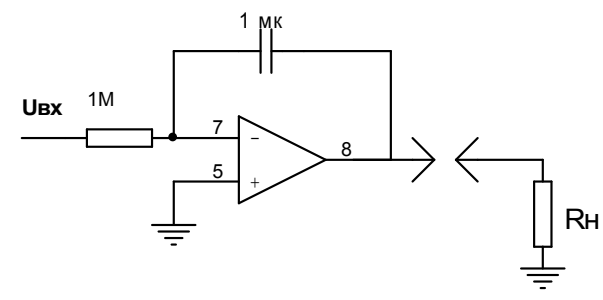
т.е. $U_{\text{вх}}$ с точностью до $\frac{1}{RC}$ повторяет интеграл $U_{\text{вх}}$. «-» говорит о том, что

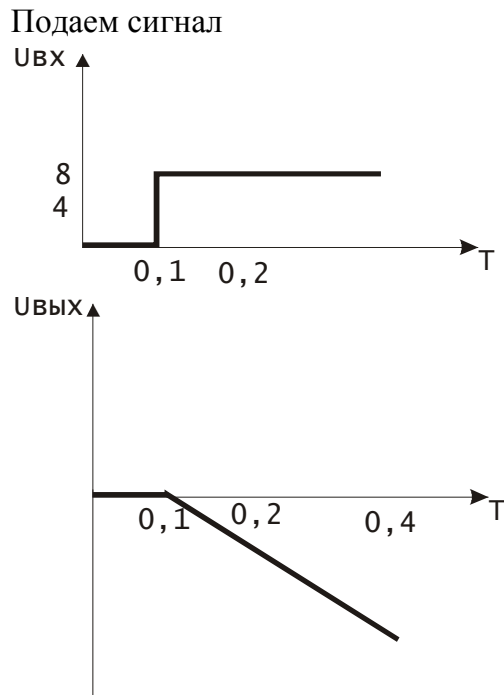
напряжение в противофазе, т.е. инвертирует.

Частный случай: при $RC=1$: $U_{\text{вх}} = -\int U_{\text{вх}} dt$

$$RC=1=10^6 \text{ Ом} \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$$

Пример:





В первый момент времени $U_{\text{вых}}=0$.

$$U_{\text{вх}}=8 \text{ В} \Rightarrow U_{\text{вых}} = -\int 8 dt = -8 \int dt = -8t + U_0 ,$$

где U_0 – начальные условия ($U_0=0$); $t=0.1; 0.2; 0.3 \dots$ сек

Литература.

1. Основы системного аналізу. Ладанюк А.П. Київ, „Нова книга”, 2004р.
2. Зайченко Ю.П. Исследование операций. К, ВШ. 1975.
3. Глушков В.М. Введение в кибернетику. К. АН УССР. 1964.
4. Красовский А.А. Динамика непрерывных самонастраивающихся систем. М. ФизМатГиз. 1963.
5. Соболев И.М. Метод Монте-Карло. М. ФизМатГиз. 1968.
6. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Прикладные задачи теории вероятности. М. Радио и связь. 1983.
7. Дж. Тейлор. Введение в теорию ошибок. М. «Мир». 1985.
8. Турбович И.Т. Опознавание образов. М. Наука. 1971.
9. Интегральные роботы. Сб. Вып.2. М. «Мир», 1975.