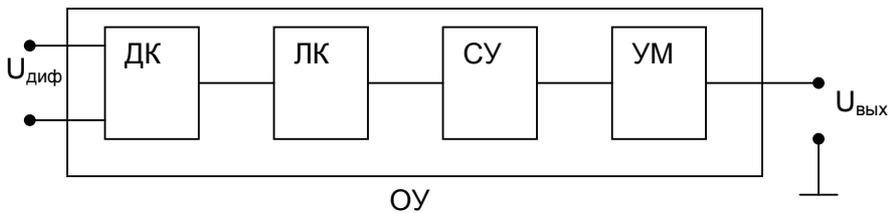


Интегральные операционные усилители (ИОУ)

ИОУ – усилитель постоянного тока (УПТ)

Он имеет: $R_{вх} = \infty$, $R_{вых} = 0$, $K_{уд} = \infty$.



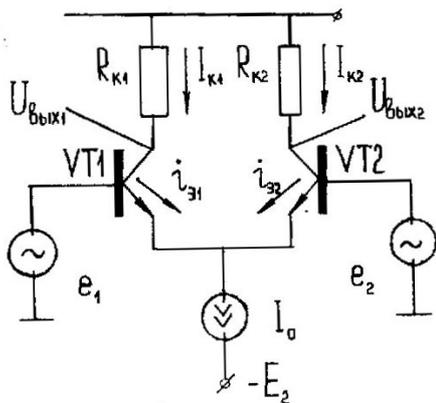
ДК – дифференциальный каскад. Усилитель постоянного тока.

ПК – промежуточный каскад. Их может быть несколько. Построен по схеме ДК, но на выходе напряжение снимается с одного плеча.

СУ – сдвиг уровня. Согласует по постоянному току выход ПК и вход УМ.

УМ – усилитель мощности. Служит для согласования с нагрузкой $R_{вых}$. Обеспечивает большой ток в нагрузку.

ДК:



$$I_{э1} + I_{э2} = I_0$$

$$R_{k1} = R_{k2} = R_k$$

➤ Пусть $e_1 = \square$, $e_2 = 0$
 Входом для ДК является $\Delta e = e_1 - e_2$
 $\Rightarrow \uparrow$ ток $I_{б1} \Rightarrow \uparrow I_{к1} \Rightarrow$ потенциал $\varphi_{к1} = U_{вых1} = E_1 - I_{к1} R_{к1}$
 уменьшился на U_{max}

$\downarrow \Rightarrow \varphi_{к2}$ возрастает на U_{max}

$I_{к1}$

$$U_{вых} = \varphi_{к1} - \varphi_{к2} \Rightarrow U_{вых} \downarrow \text{ на } 2U_{max}$$

$$U_{вых} = -2 U_{max}$$

$$K_{уд} = \Delta U_{вых} / \Delta U_{вх} = \Delta U_{вых} / e_1$$

➤ Пусть $e_2 = \square$, $e_1 = 0$
 $\varphi_{к1}$ возрастает на U_{max} , $\varphi_{к2}$ уменьшается на U_{max}

$$U_{вых} = 2 U_{max}$$

$$K_{уд} = \Delta U_{вых} / \Delta U_{вх} = \Delta U_{вых} / e_2 (e_1 = 0)$$

➤ синфазный сигнал



$$e_2 = e_1$$

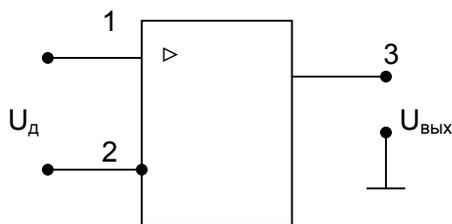
Если на оба входа подаются сигналы одинаковые по величине и фазе, то такой сигнал называется **синфазным**.

ДК не усиливает синфазный сигнал.

$$K = 100 \dots 1000$$

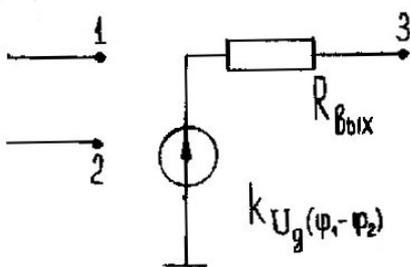
$$U_{вх.маx} = 10 \dots 1000 \text{ мВ}$$

Условное обозначение



- 1 – не инвертирующий вход
- 2 – инвертирующий вход
- 3 – выход

Схема замещения



$$U_{вых} = K_{уд}(\varphi_1 - \varphi_2)$$

|
конечная величина ∞

$$K_{уд} = 10^4 \dots 10^5$$

$$U_{вых} / K_{уд} = \varphi_1 - \varphi_2 = 0 \Rightarrow \varphi_1 = \varphi_2$$

- Дифференциальный коэффициент усиления по напряжению

$$K_{уд} = \partial U_{вых} / \partial U_{вх}$$

$$K_{уд} = 10^4 \dots 10^5 \text{ пока ОУ не вошел в режим насыщения}$$

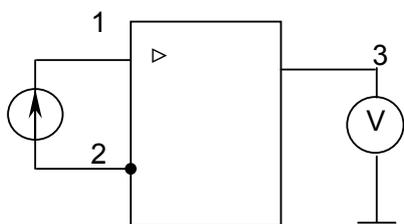
- Коэффициент синфазного напряжения

$$K_{исф} = \partial U_{вых} / \partial U_{сф} = U_{вых} / U_{сф} \rightarrow 0, \text{ но не равен } 0, \text{ т.к. в реальном ОУ } R_{k1} \neq R_{k2} \text{ и } VT_1 \neq VT_2$$

- Коэффициент ослабления синфазной составляющей

$$K_{осф} = 20 K_{исф} / K_{уд}$$

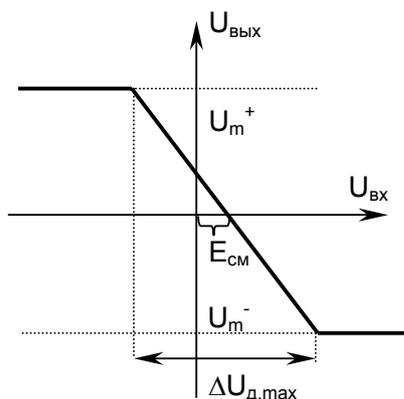
- Напряжение смещения



Напряжение смещения – такое напряжение, которое надо подать на вход ОУ дифференциальным образом, чтобы на выходе напряжение равнялось 0.

Причина $E_{см}$ – асимметрия дифференциальных каскадов.

➤ Передаточная характеристика



$$U_d = \varphi_1 - \varphi_2$$

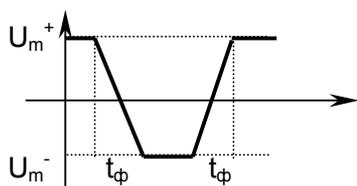
Угол наклона - $K_{ид}$

$\Delta U_{д.мах}$ – изменение входного напряжения, когда ОУ работает в линейном режиме.

$$\Delta U_{вх.д.} = \frac{U_m^+ + U_m^-}{K_{ид}}$$

$$\Delta U_{вх.д} = 10^{-4} \dots 10^{-5}$$

➤ Динамические параметры



$t_ф$ – время фронта среза

$$V_{\max.ср.} = \frac{U_m^+ - U_m^-}{t_{сф}} = 2 \frac{U_m}{t_{сф}}$$

➤ Частотные свойства

$$f = 0 \dots f_1$$

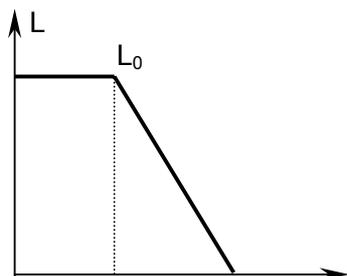
f_1 – частота единичного среза – частота, при которой коэффициент усиления равен 1.

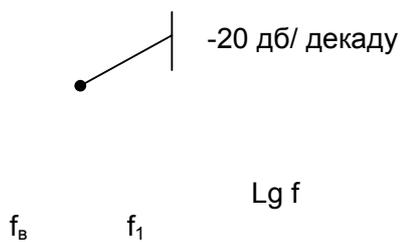
ОУ требует частотной коррекции, такой чтобы в диапазоне $0 \dots f_1$ он вел себя как инерционное звено первого порядка. Для этого на выходе ОУ ставят большое C_n и проводится это внутренним или внешним образом.

Если в ОУ встроен C_n , то в справочнике указывается f_b и f_1 .

Если в ОУ не встроен C_n , то в справочнике указывается схема коррекции (как надо подключать C_n)

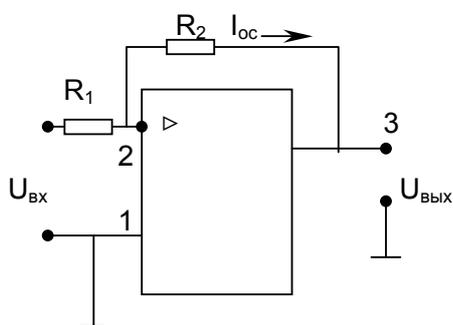
$$L = 20 \lg K_{ид}$$





Основные схемы применения

Инвертирующий усилитель



Обязательна отрицательная обратная связь (чтобы были усилительные функции) \Rightarrow сигнал с выхода направляется на инвертирующий вход.

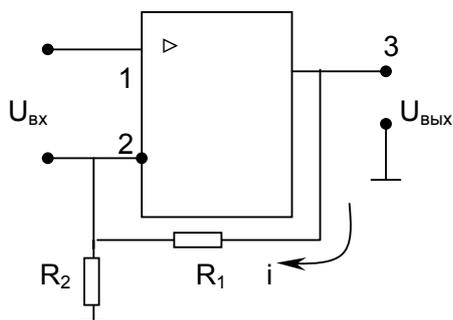
$$\varphi_1 = 0 \Rightarrow \varphi_1 - \varphi_2 = 0 \text{ т.к. } \varphi_1 = \varphi_2$$

$$I_{ВХ} = I_{ОС}$$

$$I_{ВХ} = (U_{ВХ} - \varphi_2) / R_1 = (\varphi_2 - U_{ВЫХ}) / R_2 = I_{ОС} \Rightarrow U_{ВХ} / R_1 = - U_{ВЫХ} / R_2$$

$$K_U = U_{ВЫХ} / U_{ВХ} = - R_2 / R_1$$

Неинвертирующий усилитель



$$\varphi_1 = \varphi_2$$

$$i = U_{ВЫХ} / (R_1 + R_2)$$

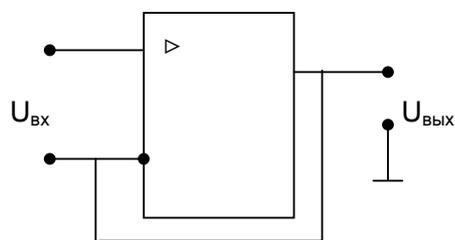
$$\varphi_2 = i R_2$$

$$\Rightarrow \varphi_2 = (R_2 U_{ВЫХ}) / (R_1 + R_2) = U_{ВХ}$$

$$K_{уд} = 1 + R_1 / R_2$$

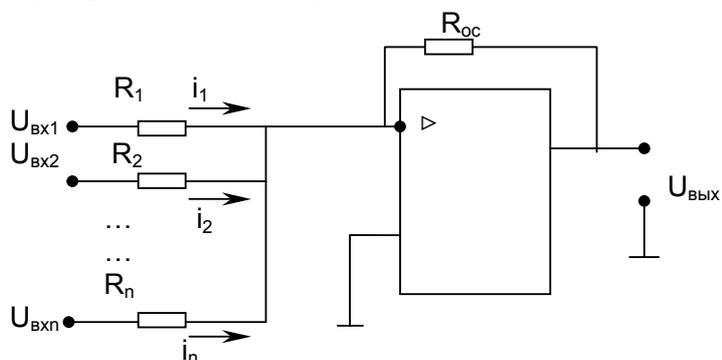
Повторитель

$R_2 = \infty, R_1 = 0$ – получаем повторитель



$$K_u = 1$$

Поразрядный преобразователь тока



$$i_1 + i_2 + \dots + i_n = i_{oc}$$

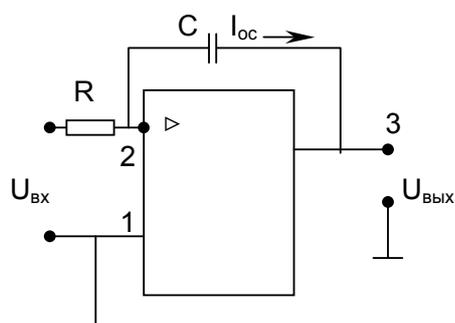
$$\frac{U_{ВХ1} - \varphi_2}{R_1} + \frac{U_{ВХ2} - \varphi_2}{R_2} + \dots + \frac{U_{ВХn} - \varphi_2}{R_n} = \frac{\varphi_2 - U_{ВЫХ}}{R_{oc}}$$

$$\varphi_1 = \varphi_2 = 0$$

$$U_{ВЫХ} = - \left(\frac{R_{oc}}{R_1} U_{ВХ1} + \frac{R_{oc}}{R_2} U_{ВХ2} + \dots + \frac{R_{oc}}{R_n} U_{ВХn} \right)$$

Преобразует поразрядно токи в ОУ.

Интегратор



$$I_{ВХ} = I_{oc} = I_c$$

$$\frac{U_{ВХ} - \varphi_2}{R} = -C \frac{dU_{ВЫХ}}{dt}$$

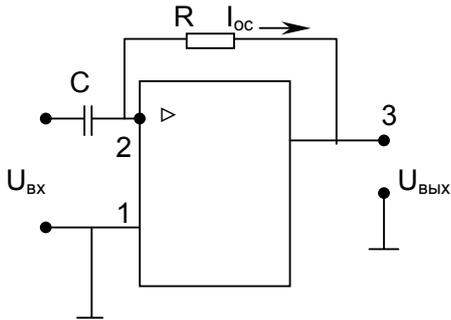
$$\varphi_2 = \varphi_1 = 0$$

$$C \frac{d(\varphi_2 - U_{ВЫХ})}{dt} = C \frac{dU_{ВЫХ}}{dt}$$

$$dU_{ВЫХ} = -U_{ВХ} \frac{1}{RC} dt$$

$$U_{ВЫХ} = -\frac{1}{RC} \int U_{ВХ} dt$$

Дифференциатор



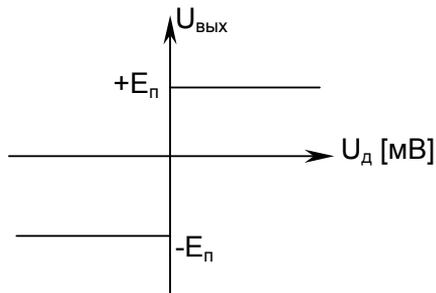
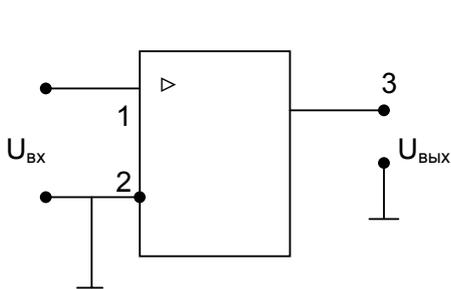
$$I_{ВХ} = I_{OC} = I_C$$

$$\varphi_2 = \varphi_1 = 0$$

$$C \frac{dU_{ВХ}}{dt} = \frac{\varphi_2 - U_{ВЫХ}}{R}$$

$$U_{ВЫХ} = RC \frac{dU_{ВХ}}{dt}$$

Компаратор

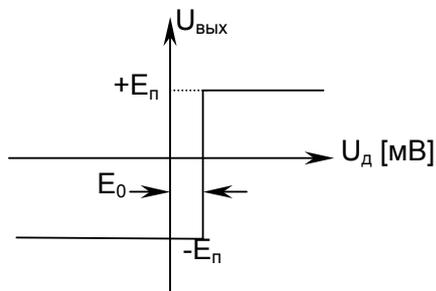
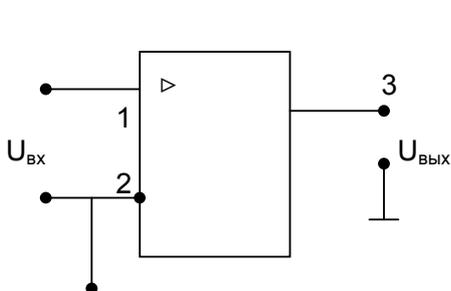


$U_д = \varphi_1 - \varphi_2$
 ОУ имеет большой коэффициент усиления.

$$U_{ВХ} = \varphi_1$$

$$\varphi_2 = 0$$

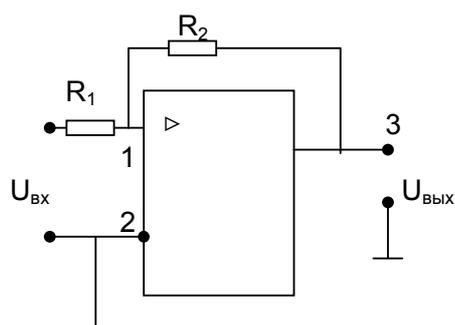
$$U_д = \varphi_1 - \varphi_2 = 0$$



$$+E_0$$

$$\varphi_2 = E_0$$

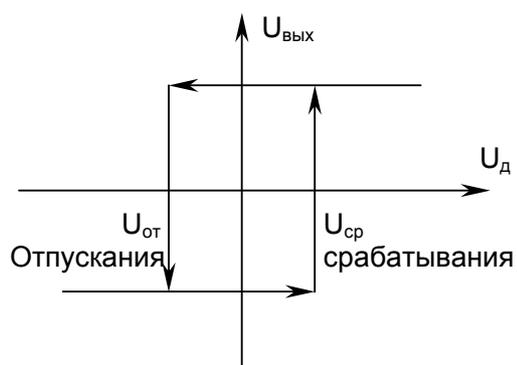
Неинвертирующий триггер Шмитта



Наличие ПОС говорит о том, что это пороговое устройство.

ПОС – сигнал с выхода на неинвертирующий вход.

Переходная характеристика.



1. $\uparrow U_{\text{ВХ}} \Rightarrow$ срабатывание из U_m^- в U_m^+

$$U_m^+ = U_m$$

$$U_m^- = -U_m$$

$$|U_m^-| = |U_m^+|$$

2. $\downarrow U_{\text{ВХ}} \Rightarrow$ отпускание из U_m^+ в U_m^-

$$\varphi_a = \frac{U_{\text{ВХ}} + \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}; \quad \varphi_a = \varphi_1 = \varphi_2 = 0 \Rightarrow \frac{U_{\text{ВХ}}}{R_1} + \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{R_2} = 0 \Rightarrow U_{\text{ВХ}} = -\frac{R_1}{R_2} U_{\text{ВЫХ}}$$

$$U_{\text{ср}} = -\frac{R_1}{R_2} U_m^- = \frac{R_1}{R_2} U_m$$

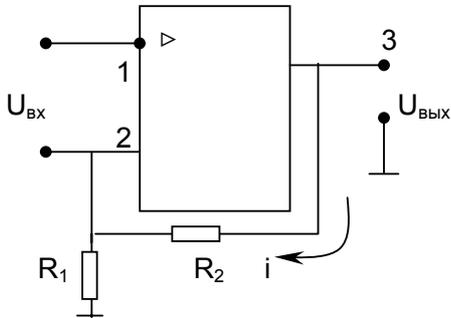
$$\downarrow U_{\text{ВХ}} : U_{\text{ВХ}} = U_{\text{отп}}$$

$$U_{\text{отп}} = -\frac{R_1}{R_2} U_m^+ = -\gamma U_m$$

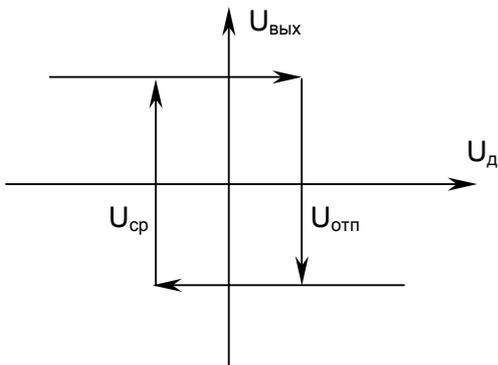
$$U_{\text{ср}} = \gamma U_m$$

Инвертирующий триггер Шмитта

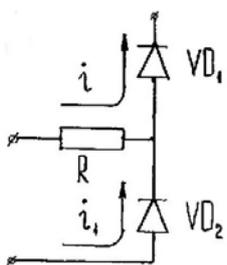
Пороговое устройство



Переходная характеристика.



3. $\downarrow U_{вх} \Rightarrow$ срабатывание из $U_{м}^-$ в $U_{м}^+$
4. $\uparrow U_{вх} \Rightarrow$ отпускание из $U_{м}^+$ в $U_{м}^-$



$$\varphi_1 = \varphi_2; \varphi_2 = U_{вх}$$

$$\varphi_1 = \frac{R_1 \cdot U_{вых}}{R_1 + R_2}$$

переброс, когда $\varphi_1 = \varphi_2$

$$U_{вых} = \gamma U_{вх}$$

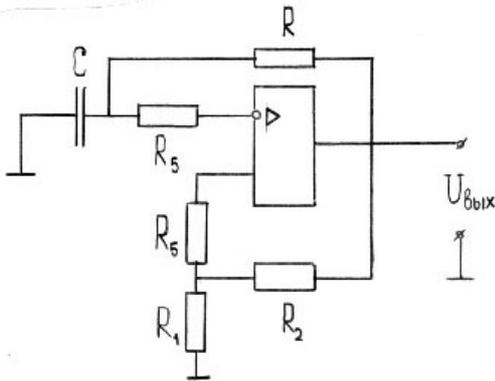
$$U_{м}^- \gamma = U_{вх} = U_{ср}$$

$$U_{вых} = U_{м}^+ \Rightarrow U_{вх} = U_{отп}$$

$$U_{вых} = \gamma U_{м}^+ = U_{отп}$$

Мультивибратор

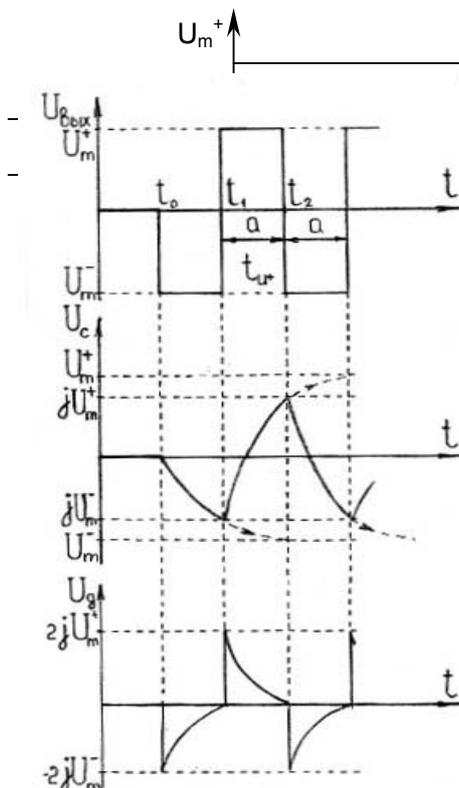
Относится к генераторам импульсов релаксационного типа. Выходные сигналы представляют собой периодические последовательности импульсов прямоугольной, трапецидальной или треугольной формы. Для генерации прямоугольных импульсов используются релаксационные генераторы разрывных колебаний (релаксаторы). Они содержат один или несколько реактивных элементов, которые вместе с активными определяют длительность выходных (генерируемых) импульсов. Для построений часто используют усилители с положительной обратной связью (ПОС)ю Такие генераторы называются мультивибраторами. Любой генератор может работать в двух режимах: ждущем и автоколебательном. В ждущем режиме схемы обладают одним состоянием устойчивого равновесия и одним – неустойчивого. При подаче входного сигнала схема переходит в состояние квази-равновесия и по истечении некоторого времени выдержки возвращается в исходное состояние ⇒ на выходе получаем один импульс. В автоколебательном режиме два состояния квази-равновесия и не одного устойчивого. Схема самопроизвольно переходит из одного состояния в другое и на выходе генерируется непрерывная последовательность импульсов. Рассмотрим схему мультивибратора на базе интегрального операционного усилителя (ИОУ):



На сопротивлении R1-R2 выполнена обратная положительная связь.

R-C – времязадающая цепь.

Если $\varphi_1 > \varphi_2 \Rightarrow U_{\text{вых}} = U_m^+$
 Если $\varphi_1 < \varphi_2 \Rightarrow U_{\text{вых}} = U_m^-$



дифференциальное $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$

$$U_{\text{вых}} = -U_m \text{ (в т. } t^0)$$

$$\varphi_1 = \frac{U_{\text{вых}}}{R_1 + R_2} \cdot R_1 = U_{\text{вых}} \cdot j$$

$$U_{\text{вых}} = U_m^- \Rightarrow \varphi_1 = jU_m^- = -jU_m$$

$$U_{\text{вых}} = U_m^+ \Rightarrow \varphi_1 = jU_m$$

Длительность генерируемых импульсов

$$t_{\text{имп}}^+ = \tau \ln \frac{U_c(\infty) - U_c(0)}{U_c(\infty) - U_c(t_1)}$$

$$U_c(\infty) = U_m$$

$$U_c(0) = -jU_m$$

$$U_c(t_1) = jU_m$$

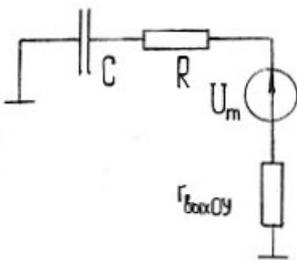
$$t_{\text{имп}}^+ = \tau \ln \frac{U_m + jU_m}{U_m - jU_m} = RC \ln \frac{1+j}{1-j}$$

$$j = R_1 / (R_1 + R_2)$$

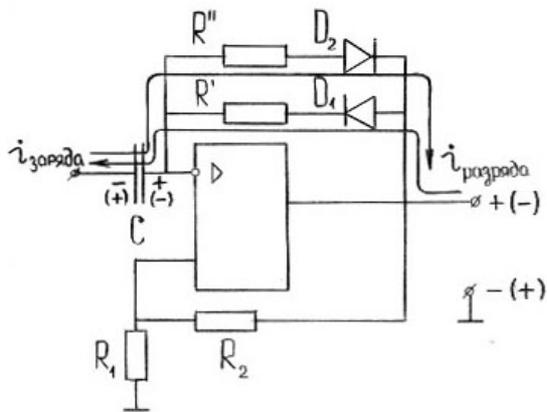
$$t_{\text{имп}}^+ = RC \ln \left(1 + \frac{2R_1}{R_2} \right)$$

Скважность – $Q = T/t_{и} = (t_{и}^+ + t_{и}^-) / t_{и} = 2 t_{и} / t_{и} = 2$
 Частота генерируемых импульсов – $f = 1/T$

Практические замечания.



1. $\tau = C (R + r_{вхОУ}) = RC$, т.к. $R \gg r_{вхОУ} \rightarrow 0$
2. j выбирать большим нельзя (приводит к неисправной работе схемы) \Rightarrow малая амплитуда на выходе (малая длительность импульса) $\Rightarrow j = 1/3 \dots 2/3$
1. $R \ll r_{вхОУ}$, но при большом сигнале происходит уменьшение $r_{вхОУ}$ (т.к. транзистор входного каскада входит в режим насыщения) \Rightarrow для защиты входа ставят балластные сопротивления – $R_0 = 100 \text{ кОм} \gg R$
2. Реальная длительность импульса не совпадает с рассчитанным (из-за паразитных емкостей) $\Rightarrow C \gg C_{\text{параз.}}$
3. Если мы хотим получить несимметричный мультивибратор (т.е. $t_{и}^+ \neq t_{и}^-$), то

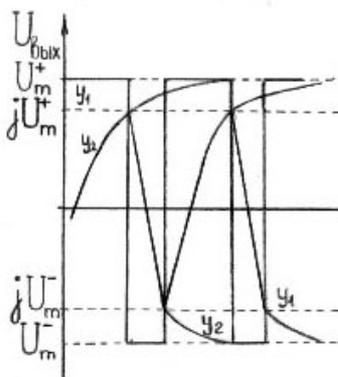


$$\tau_{\text{заряда}} = CR'$$

$$\tau_{\text{разряда}} = CR''$$

$$T = t_{и}^+ + t_{и}^-$$

$$Q = T / t_{и}^+ \neq 2$$



Можно изменить коэффициент j (т.е. R_1 и R_2)

\Rightarrow изменится $t_{и}^+$ и $t_{и}^-$

$$t_{\text{имп}} = \tau \ln \left(1 + \frac{2R_1}{R_2} \right) \text{ (в формулу не входит } U_{и}\text{)}$$

Длительность выходного импульса не зависит от E_n