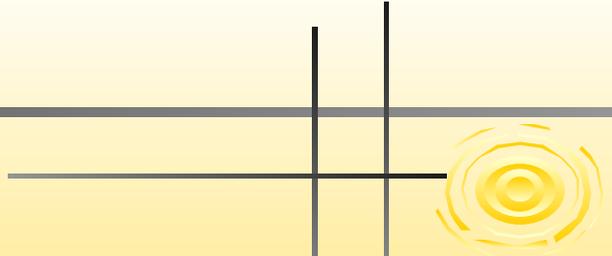
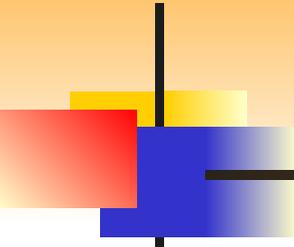


Электротехника и электроника

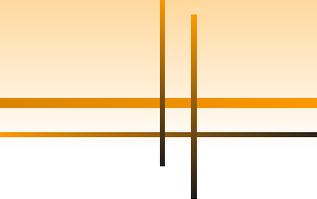


Триггеры и мультивибраторы



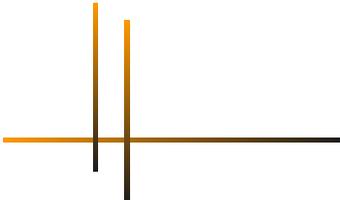


Триггеры



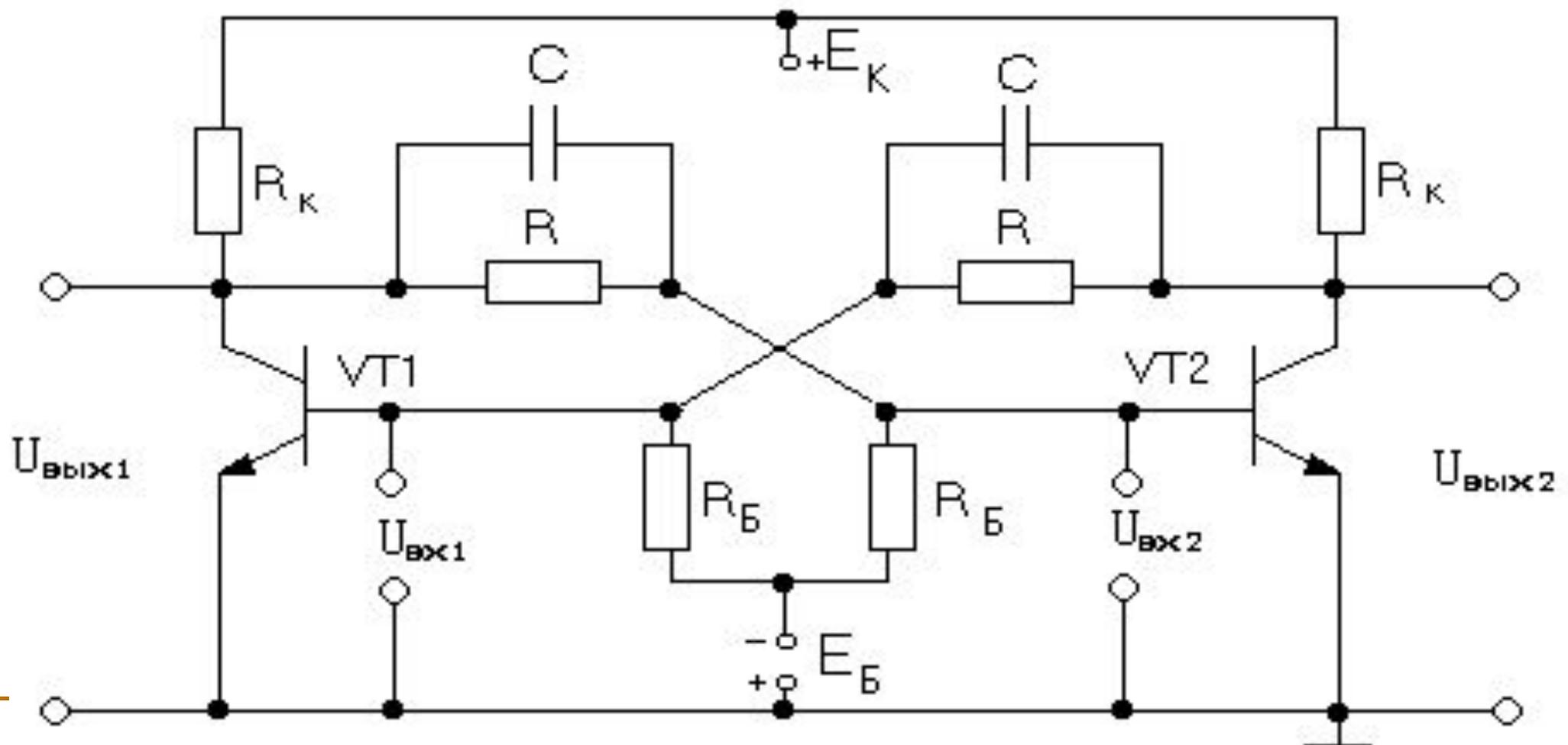
Триггером называется устройство с положительной обратной связью (ПОС), которое имеет два состояния устойчивого равновесия и может скачкообразно переходить из одного состояния в другое под воздействием управляющего напряжения.

Наибольшее распространение получил триггер на основе многокаскадных ключей с ПОС. Если все ключи триггера реализованы по идентичным схемам, то его называют симметричным.



Симметричный триггер

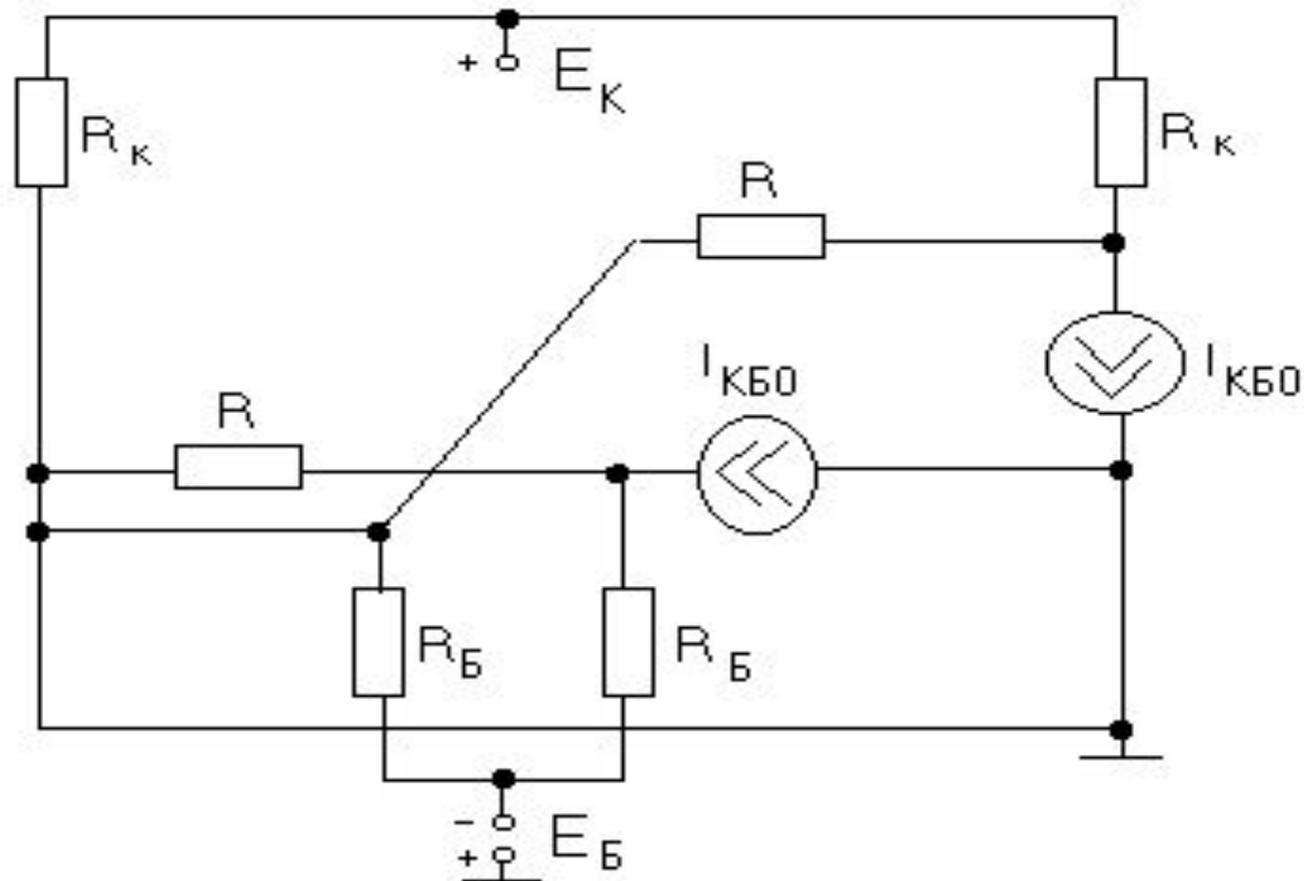
Состоит из двух идентичных транзисторных ключей, охваченных перекрестной положительной ОС. Выход первого ключа соединен со входом второго, а выход второго ключа – со входом первого.



Симметричный триггер

Триггер имеет два состояния устойчивого равновесия: VT1 в режиме насыщения, VT2 в режиме отсечки и наоборот.

Пусть в исходном состоянии VT1 в режиме насыщения, а VT2 в режиме отсечки. Эквивалентная схема имеет вид.



Симметричный триггер

Для выполнения условия насыщения транзистора VT1 необходимо:

$$I_{\text{б1}} > I_{\text{бн}} = I_{\text{кн}} / \beta = E_{\text{к}} / (R_{\text{к}} * \beta).$$

Из эквивалентной схемы:

$$I_{\text{бн}} = (E_{\text{к}} - I_{\text{кб0}} * R_{\text{к}}) / (R_{\text{к}} + R) - E_{\text{б}} / R_{\text{б}} \geq E_{\text{к}} / (R_{\text{к}} * \beta).$$

Для обеспечения нахождения транзистора VT2 в режиме отсечки необходимо выполнение условия:

$$U_{\text{бэ}} < 0; \quad U_{\text{бэ}} = - E_{\text{б}} * R / (R + R_{\text{б}}) + I_{\text{кб0}} * R \parallel R_{\text{б}} < 0,$$

откуда

$$E_{\text{б}} * R / (R + R_{\text{б}}) > R * R_{\text{б}} / (R + R_{\text{б}}) * I_{\text{кб0}}; \quad E_{\text{б}} > R_{\text{б}} * I_{\text{кб0}}.$$

Так как триггер выполнен по симметричной схеме, то условия насыщения и запираения в другом состоянии аналогичны.

Симметричный триггер

Рассмотрим процесс перехода триггера из одного состояния устойчивого равновесия в другое под воздействием закрывающего импульса, поданного на базу первого транзистора. Условно этот процесс разбивают на четыре этапа.

Первый этап. Рассасывание избыточных носителей в области базы VT1. Внешних изменений в схеме не наблюдается. Заканчивается выходом VT1 из насыщения и восстановлением усилительных свойств.

Второй этап. Переход транзистора VT2 из режима отсечки в активный режим и восстановление усилительных свойств.

Третий этап. Выполняются условия регенерации; $k_1 * k_2 \geq 1$, $\phi_{k_1} + \phi_{k_2} = 2\pi$.

Триггера скачкообразно переходит из одного состояния устойчивого равновесия в другое:

$$I_{\beta 1} \downarrow \rightarrow I_{k1} \downarrow \rightarrow U_{Rk1} \downarrow \rightarrow U_{k1} \uparrow \rightarrow I_{\beta 2} \uparrow \rightarrow I_{k2} \uparrow \rightarrow U_{Rk2} \uparrow \rightarrow U_{k2} \downarrow \rightarrow I_{\beta 1} \downarrow.$$

Заканчивается закрыванием транзистора VT1 и прекращением действия ПОС.

Перестают выполняться условия возникновения генерации.

Симметричный триггер

Четвертый этап. Устанавливаются коллекторные напряжения VT1 и VT2. Время установления U_K VT1 определяется временем заряда конденсатора C по цепи:

$$+E_{II} \rightarrow R_K \rightarrow C \rightarrow VT2 \rightarrow -E_{II}.$$

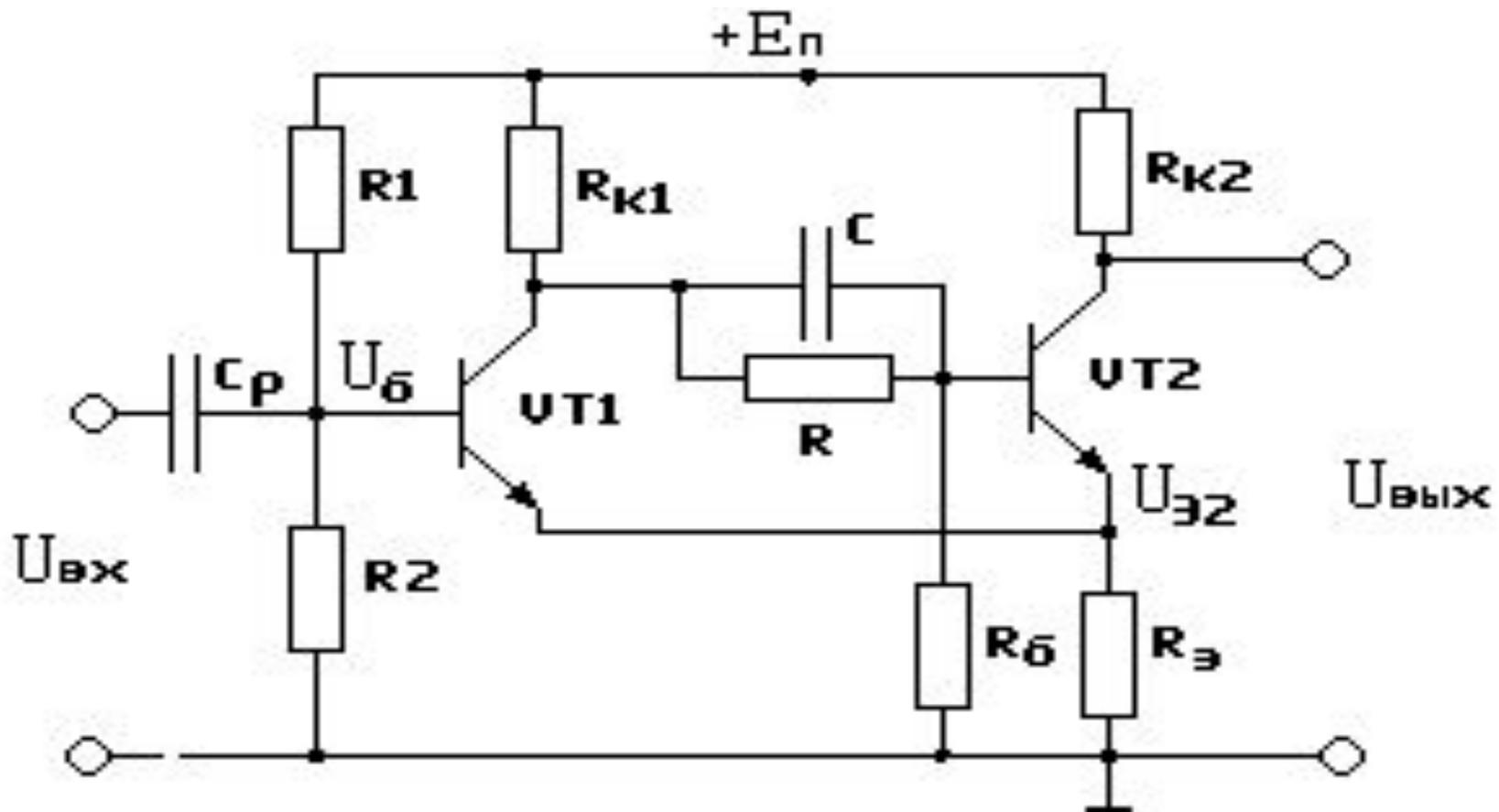
Для уменьшения этого времени необходимо уменьшать постоянную времени $C \cdot R_K$. Напряжение на коллекторе VT2 стремится к нулю со скоростью, зависящей от величины базового тока VT2 к моменту окончания этапа регенерации. Чем больше базовый ток, тем меньше время установления, тем больше должна быть величина $C \cdot R_K$.

Для возвращения триггера в исходное состояние необходимо подать на базу открытого транзистора запускающий импульс отрицательной полярности.

Выходной импульс имеет длительность, равную периоду повторения запускающих импульсов.

Триггер Шмитта

Триггер Шмитта или несимметричный триггер с эмиттерной связью используют для преобразования синусоидального сигнала в импульсное, как пороговый переключатель и т.д.



Триггер Шмитта

При отсутствии входного сигнала транзистор VT1 находится в режиме отсечки, а транзистор VT2 - в режиме насыщения. На резисторе $R_{\text{Э}}$ формируется напряжение

$$U_{R_{\text{Э}}} = U_{\text{Э2}} = E_{\text{П}} * R_{\text{Э}} / (R_{\text{Э}} + R_{K2}),$$

а на базе первого транзистора

$$U_{\text{Б}} = E_{\text{П}} * R2 / (R1 + R2).$$

Параметры резисторов $R1$, $R2$, $R_{\text{Э}}$ и R_{K2} выбирают таким образом, чтобы выполнялось условие:

$$U_{\text{БЭ}}^{\text{VT1}} = U_{\text{Б}} - U_{\text{Э2}} < 0.$$

В этом случае транзистор VT1 находится в режиме глубокой отсечки, а ток коллектора равен

$$I_{K1} = I_{KB0}.$$

Резистор R рассчитывают из условия нахождения транзистора VT2 в режиме насыщения.

Триггер Шмитта

Рассмотрим процесс увеличения входного напряжения. С его ростом состояние схемы не будет меняться до тех пор пока $U_{БЭ}^{VT1} < 0$. Как только входное напряжение достигает такого уровня, что $U_{БЭ}^{VT1} > 0$, то транзистор V1 выйдет из режима отсечки и начнется процесс перехода триггера в другое состояние:

$$\begin{array}{ccccccccccc} U_{БЭ}^{VT1} \uparrow & \rightarrow & I_{Б1} \uparrow & \rightarrow & I_{К1} \uparrow & \rightarrow & U_{RК1} \uparrow & \rightarrow & U_{К1} \downarrow & \rightarrow & U_{Б2} \downarrow & \rightarrow \\ I_{Б2} \downarrow & \rightarrow & I_{К2} \downarrow & \rightarrow & I_{Э2} \downarrow & \rightarrow & U_{RЭ} \downarrow & \rightarrow & U_{БЭ}^{VT1} \uparrow & \cdot & & \end{array}$$

Транзистор VT1 переходит в режим насыщения, а транзистор VT2 – в режим отсечки.

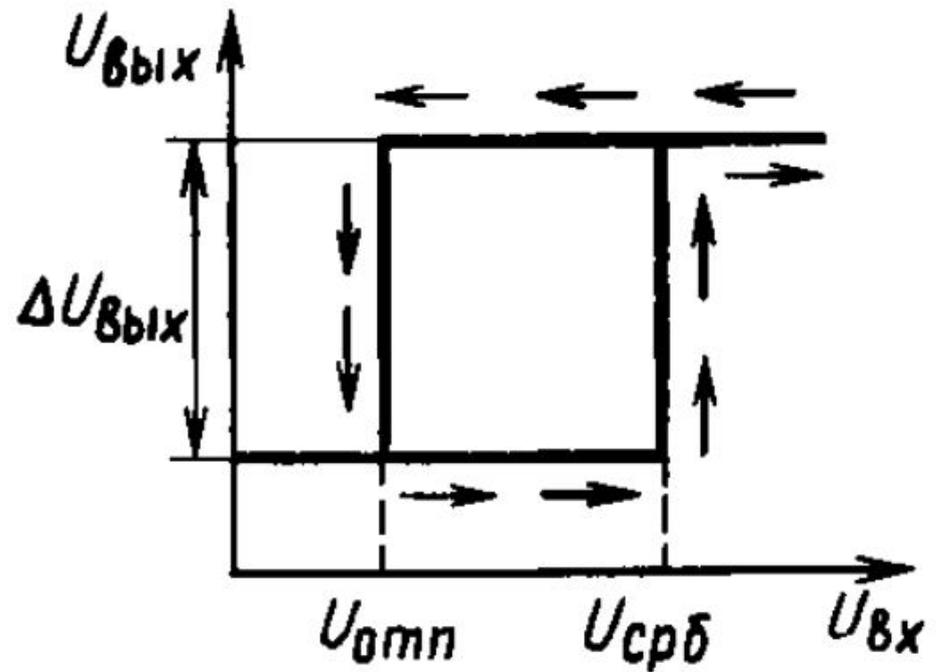
Напряжение, при котором происходит переброс триггера, называется напряжением срабатывания $U_{срб}$.

Если теперь уменьшать входное напряжение, то обратное опрокидывание триггера произойдет не в точке $U_{срб}$, а при несколько меньшем напряжении $U_{отп}$, которое называется напряжением отпущения.

Триггер Шмитта

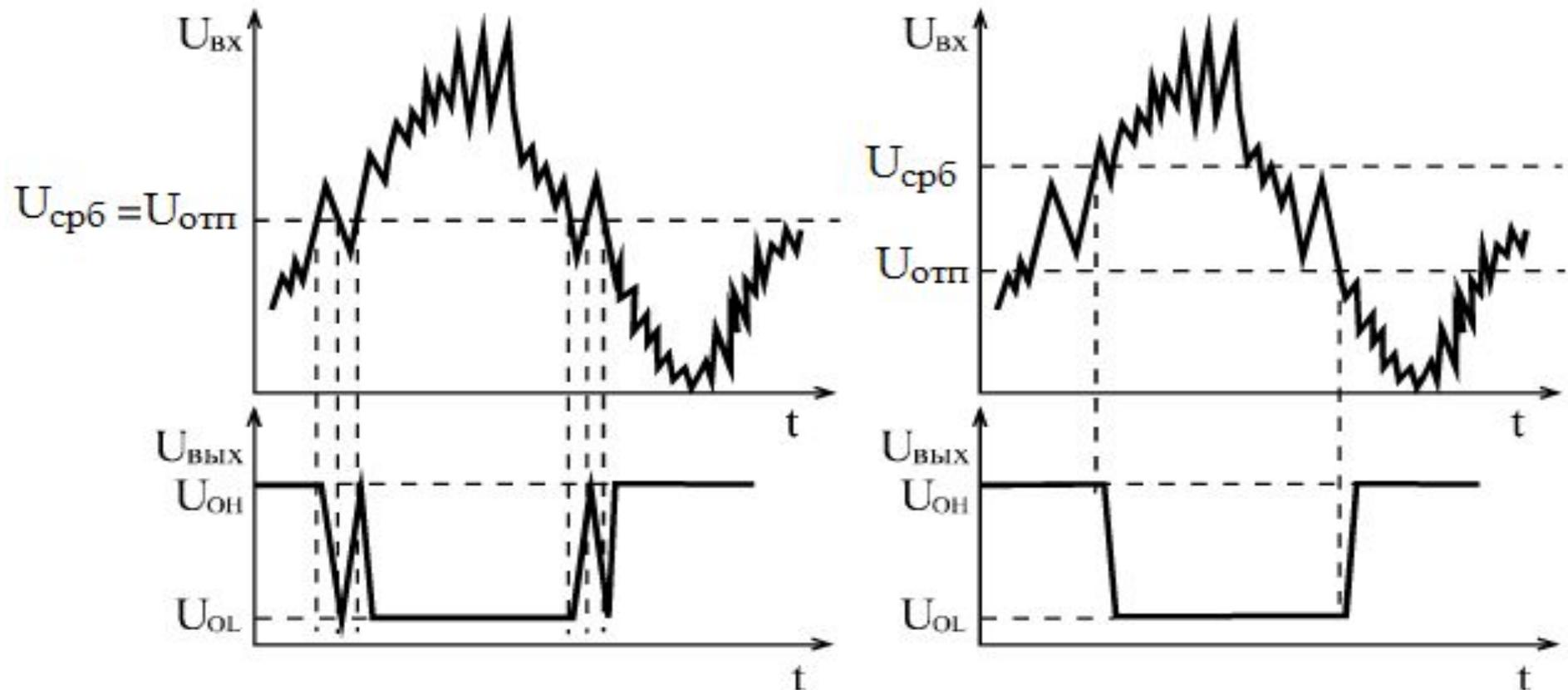
Параметры компонентов схемы выбирают так, чтобы ток насыщения транзистора VT2 был больше тока насыщения транзистора VT1 (обычно $R_{к1} = (2..3)R_{к2}$). Поэтому $U_{э2} > U_{э1}$, а $U_{срб} > U_{отп}$.

Передаточная характеристика имеет вид, представленный на рисунке.



Триггер Шмитта

Применяют для формирования резких перепадов напряжения из сравнительно медленных входных сигналов при наличии в них шумов и (или) дребезга.



Мультивибраторы

Мультивибратор - это релаксационный генератор, регенеративный процесс в котором осуществляется путем двух усилителей с взаимной междускадной положительной обратной связью.

Релаксационными называются генераторы, которые не имеют ни одного или имеют только одно состояние устойчивого равновесия. Они имеют в своем составе времязадающие элементы, которые определяют параметры генерируемых импульсов или (и) частоту их повторения.

Регенеративный процесс - это процесс, приводящий к образованию в схеме быстрых перепадов тока и напряжения.

Регенеративные устройства предназначены для образования быстрых перепадов напряжения или тока в нужные моменты времени.

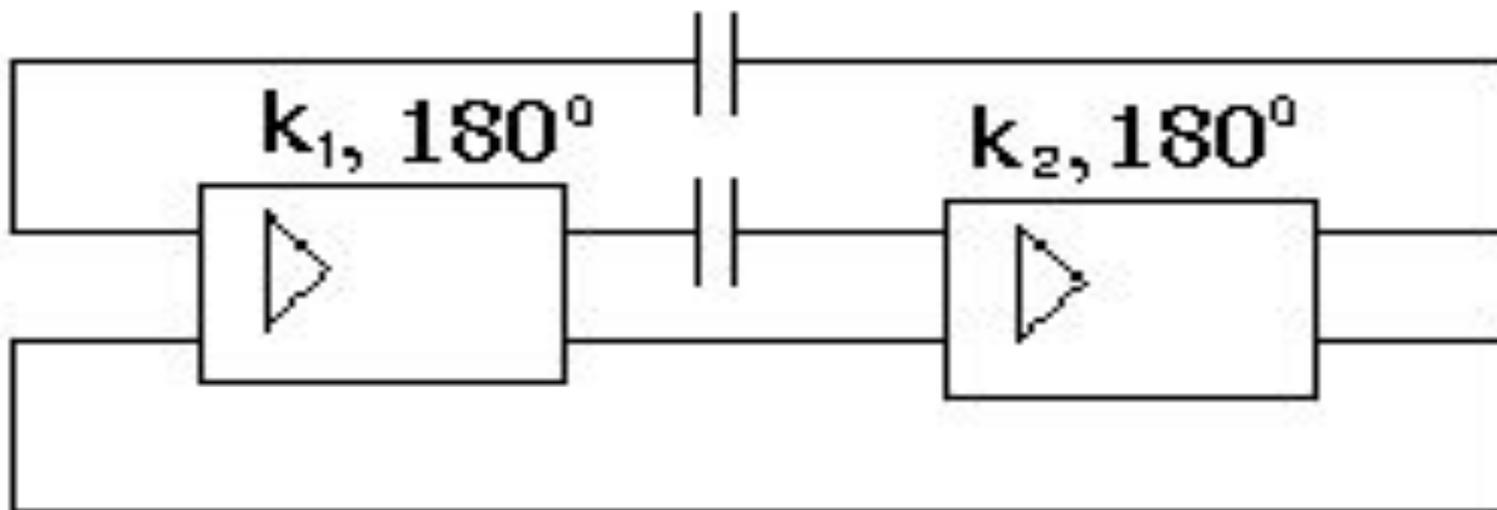
Для возникновения колебаний необходимо выполнение в широком диапазоне условий

$$k_1 * k_2 \geq 1 \text{ и } \Delta\phi = \phi_1 + \phi_2 = 2\pi n,$$

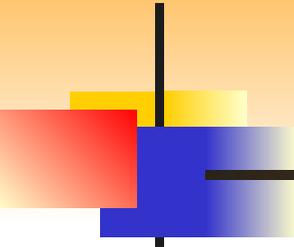
где k_1 и k_2 - коэффициенты усиления усилителей;
 $\phi_1 + \phi_2$ - сдвиг фаз в усилителях.

Мультивибраторы

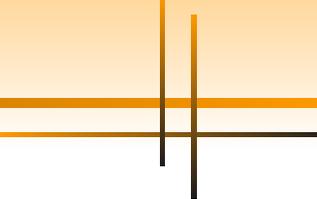
Обобщенная структура регенеративного устройства на транзисторном каскаде с общим эмиттером показана на рисунке. Условие возникновения колебаний для данной схемы имеет вид $k_1 * k_2 > 1$.



Мультивибраторы на биполярных транзисторах широко используются для получения импульсов напряжения прямоугольной формы.

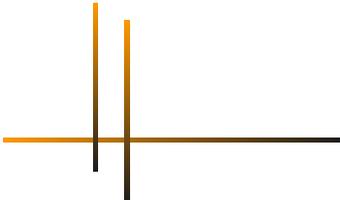


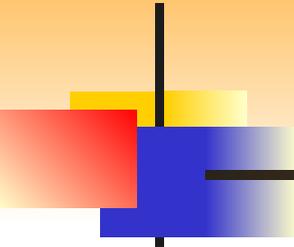
Режим работы мультивибратора



Мультивибраторы могут работать в одном из трех режимов: автоколебательном, ждущем (заторможенном), синхронизации (деления).

В режиме автоколебаний мультивибратор имеет два состояния квазиустойчивого равновесия, во время которых в схеме происходят относительно медленные изменения токов и напряжений. Квазиустойчивые состояния заканчиваются лавинообразными изменениями токов и напряжений - скачками в схеме. Мультивибратор без воздействия внешних сил поочередно переходит из одного квазиустойчивого состояния в другое и наоборот. Параметры генерируемых импульсов и период их следования определяются только параметрами элементов схемы

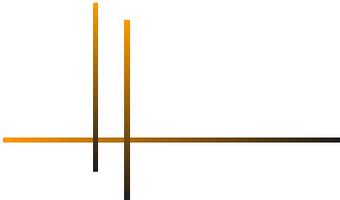




Режим работы мультивибратора

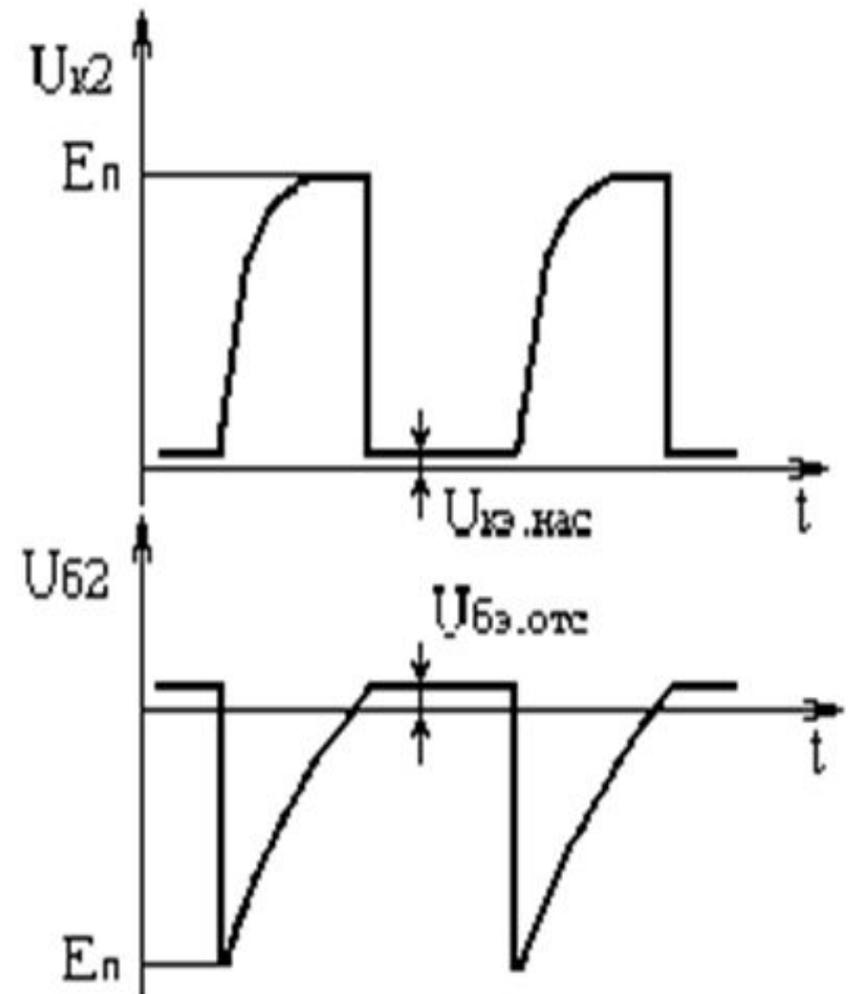
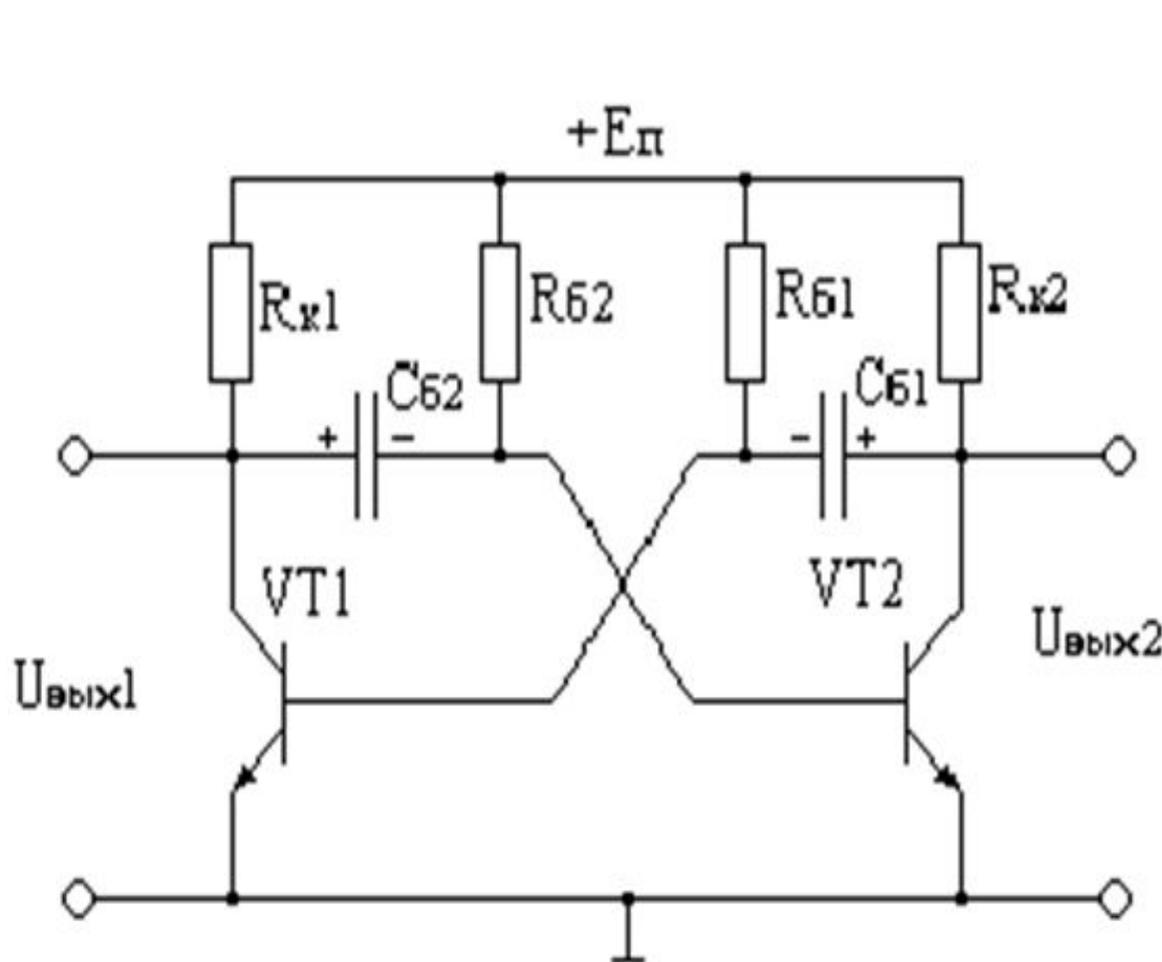
В ждущем режиме одно состояние является устойчивым - другое квазиустойчивым. Перевод схемы в квазиустойчивое состояние осуществляется внешним запускающим импульсом, а возврат в исходное состояние происходит в результате внутренних процессов. Во время цикла генерируется один импульс, параметры которого определяются параметрами элементов схемы. При подаче на вход последовательности запускающих импульсов частота выходных импульсов равна частоте входных. Эти мультивибраторы обычно используют для формирования импульсов заданной длительности и формы. Их называют также одновибраторами, кипп-реле, ждущими мультивибраторами, однотоктными релаксаторами и т.д.

В режиме синхронизации на автоколебательный мультивибратор подают внешнее синхронизирующее напряжение. В результате этого частота повторения импульсов на выходе мультивибратора становится кратной частоте синхронизирующего напряжения.



Схемы мультивибраторов

Схемы мультивибраторов различны. Рассмотрим в качестве примера автоколебательный мультивибратор с коллекторно-базовыми связями.



Работа мультивибратора

Конденсаторы $C_{\sigma 1}$ и $C_{\sigma 2}$ выполняют роль элементов связи и входят во времязадающие цепи. Другим элементом времязадающих цепей являются резисторы $R_{\sigma 1}$ и $R_{\sigma 2}$.

Мультивибратор обладает двумя состояниями квазиустойчивого равновесия: в одном состоянии транзистор VT1 открыт, транзистор VT2 закрыт; в другом -- наоборот. При выполнении условий $k_1 * k_2 > 1$ и $\Delta\phi = 2\pi n$ возникают скачки, поочередно изменяющие состояние транзисторов, после чего происходит перезаряд одного и заряд другого конденсаторов.

Мультивибратор работает в автоколебательном режиме, поэтому рассмотрение его работы можно начать с любого момента времени, например с момента времени, когда транзистор VT1 оказался в режиме насыщения, а транзистор VT2 - в режиме отсечки.

Работа мультивибратора

Транзистор VT1 можно представить эквипотенциальной точкой. Конденсатор C_{61} заряжается по цепи

$$E_n \rightarrow R_{k2} \rightarrow C_{61} \rightarrow VT1_{63} \rightarrow \perp$$

с полярностью, указанной на схеме. Транзистор VT1 удерживается в режиме насыщения суммой токов I_{R61} и I_{C61} . Причём после окончания заряда конденсатора только током I_{R61} , значение которого должно удовлетворять условию

$$I_{R61} = E_k / R_{61} > I_{6n1}.$$

В это же время между базой и эмиттером транзистора VT2 приложено отрицательное напряжение, присутствующее на конденсаторе C_{62} . У закрытого транзистора на коллекторе напряжение $\approx E_n$, а на базе в начальный момент времени после переключения $\approx -E_n$, которое затем уменьшается по экспоненциальному закону вследствие перезаряда конденсатора C_{62} по цепи

$$E_n \rightarrow R_{62} // R_{\text{эKB.VT2}} \rightarrow C_{62} - VT1_{кэ} \rightarrow \perp ,$$

где $R_{\text{эKB.VT2}}$ - входное сопротивление закрытого транзистора VT2.

Обычно $R_{\text{эKB.VT2}} \gg R_{62}$, поэтому $R_{\text{эKB.VT2}}$ в инженерных расчетах пренебрегают.

Работа мультивибратора

По мере перезаряда конденсатора C_{62} напряжение на нём уменьшается по экспоненциальному закону и в некоторый момент времени становится равным напряжению отсечки входной характеристики транзистора VT2. Начиная с этого момента развивается лавинообразный процесс переключения схемы. В результате транзистор VT2 переходит в режим насыщения, а транзистор VT1 – в режим отсечки.

Далее процесс протекает аналогично рассмотренному выше. Изменение коллекторных и базовых напряжений иллюстрируется временными диаграммами, показанными на рисунке.

Работа мультивибратора

Для определения длительности импульсов и периода их следования уточним напряжение на конденсаторах в моменты окончания заряда и начала разряда конденсаторов.

В момент окончания заряда конденсатора C_{62} напряжение на нем равно $\approx E_{\text{п}}$. На базе транзистора VT2 после его закрывания появляется напряжение $\approx -E_{\text{п}}$. Таким образом, диапазон напряжений перезаряда конденсатора C_{62} равен $\approx 2E_{\text{п}}$.

Регенерационный процесс начинается после достижения нулевого напряжения, т. е. после перезаряда конденсатора на величину $\approx E_{\text{п}}$.

Известно, что конденсатор разряжается по закону

$$U_c = U_m * \exp(-t/\tau_2),$$

где $\tau_2 = C_{62} * R_{62}$ - постоянная времени перезаряда конденсатора C_{62} .

Подставляя исходные данные, получим :

$$E_{\text{п}} = 2 * E_{\text{п}} * \exp(-t_{\text{и2}}/\tau_2),$$

где $t_{\text{и2}}$ - длительность импульса на коллекторе транзистора VT2.

Работа мультивибратора

Решим уравнение относительно $t_{и2}$. В результате получим

$$t_{и2} \approx \tau_2 * \ln 2 \approx 0,7 * R_{62} * C_{62}.$$

Длительность импульса при перезаряде конденсатора C_{61}

$$t_{и1} \approx \tau_1 * \ln 2 \approx 0,7 * R_{61} * C_{61}.$$

В случае симметричного мультивибратора, у которого $C_{61} = C_{62} = C_6$; $R_{61} = R_{62} = R_6$; $R_{к1} = R_{к2} = R_к$ и $t_{и1} = t_{и2} = t_и$, период повторения

$$T = t_{и1} + t_{и2} = 2 * t_и = 1,4 * R_6 * C_6.$$

Из анализа приведенных соотношений следует, что длительность импульсов $t_{и1}$ и $t_{и2}$ можно регулировать изменением значений конденсаторов C_{61} и C_{62} или сопротивлений резисторов R_{61} и R_{62} , т. е. изменением постоянных времени времязадающих цепей.

Работа мультивибратора

Амплитуда импульса на коллекторе насыщенного транзистора

$$U_M = E_K - I_{кбо} * R_K - U_{кэ.нас.}$$

Длительность переднего фронта импульса определяется временем заряда времязадающего конденсатора

$$\tau_{\phi} \approx 3 * C_{\phi 1} * R_{к2}.$$

Длительность среза в основном зависит от частотных свойств транзистора и описывается соотношением

$$\tau_{ср} \approx 3(\tau_{\beta} + C_{к}^* * R_{к'}),$$

где τ_{β} - постоянная времени транзистора;

$C_{к}^*$ - барьерная емкость коллекторного перехода транзистора.

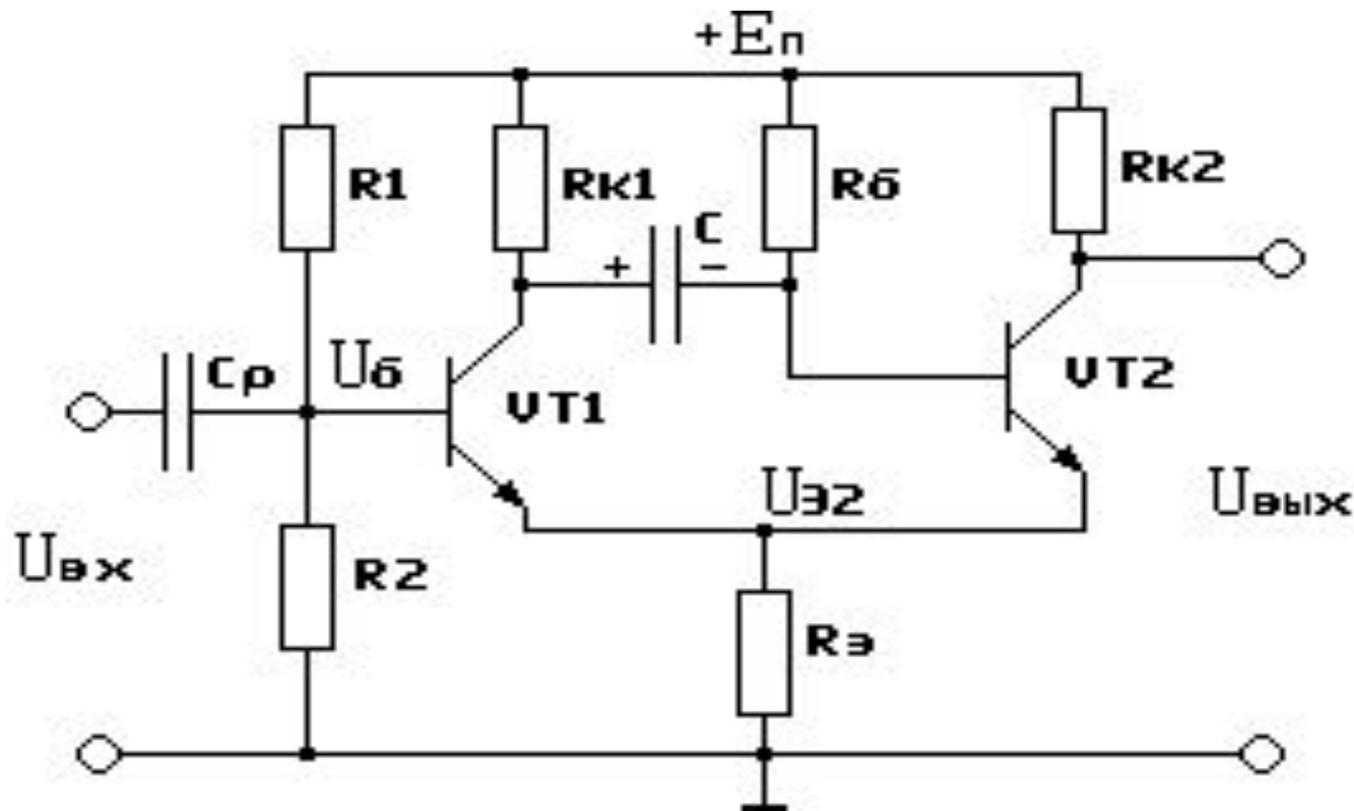
Обычно конденсатор $C_{\phi 1}$ имеет сравнительно большое значение, поэтому длительность переднего фронта во много раз больше длительности среза.

Скважность импульсов (предельная) описывается соотношением $Q \approx \beta/3$.

Ждущий мультивибратор с эмиттерной связью

Ждущий мультивибратор с эмиттерной связью предназначен:

- для формирования прямоугольных импульсов заданной длительности и амплитуды;
- для задержки импульсов на заданное время.



Ждущий мультивибратор с эмиттерной связью

Схема ждущего мультивибратора содержит двухкаскадный ключ с положительной обратной связью. Одна из связей между каскадами осуществляется с помощью конденсатора C . Другая - с помощью общего резистора R_3 .

В исходном состоянии устойчивого равновесия транзистор $VT1$ закрыт, а транзистор $VT2$ – открыт. Насыщенное состояние $VT2$ обеспечивает базовым током, протекающим через $R_6 \leq \beta R_{к2}$. В эмиттерной цепи протекает ток, за счет которого на резисторе R_3 возникает падение напряжения $U_3 = I_3 * R_3$. Одновременно через резисторы $R1$ и $R2$ протекает ток делителя, создавая на резисторе $R2$ падение напряжения U_6 .

Параметры компонентов схемы подбирают таким образом, чтобы $U_3 > U_6$, что обеспечивает закрытое состояние транзистора $VT1$.

Конденсатор C в исходном состоянии заряжен до напряжения $\approx (E_n - U_3)$ с полярностью, указанной на схеме. Путь заряда

$$+E_n \rightarrow R_{к1} \rightarrow C \rightarrow VT2_{бэ} \rightarrow R_3 \rightarrow \perp.$$

Ждущий мультивибратор с эмиттерной связью

При поступлении на базу транзистора VT1 положительного импульса с амплитудой, превышающей значение $U_m > U_{\beta} - U_{\beta}$, транзистор VT1 открывается. Напряжение на его коллекторе уменьшается. Этот отрицательный перепад поступает на базу VT2, прикрывая его и уменьшая ток эмиттера. Напряжение на резисторе R_{β} уменьшается, что приводит к увеличению базно-эмиттерного напряжения транзистора VT1, который открывается еще сильнее. Процесс повторяется. Этот лавинообразный процесс заканчивается открыванием транзистора VT1 и закрыванием транзистора VT2.

Даже при исчезновении входного сигнала состояние транзисторов не изменится, постольку транзистор VT1 насыщен током, протекающим через резистор R1, а транзистор VT2 закрыт отрицательным напряжением на конденсаторе C, которое, если представить транзистор VT1 эквипотенциальной точкой, приложено между базой и эмиттером транзистора VT2.

Ждущий мультивибратор с эмиттерной связью

В этом состоянии происходит перезаряд конденсатора C по цепи

$$+E_n \rightarrow R_6 \rightarrow C \rightarrow VT1_{кэ} \rightarrow R_9 \rightarrow \perp.$$

Напряжение на нём стремится к величине $\approx (E_k - U_{э1})$. Когда напряжение на конденсаторе достигнет нуля, транзистор $VT2$ откроется, напряжение на эмиттерах транзисторов возрастёт, транзистор $VT1$ прикроется, напряжение на его коллекторе возрастет и наступит лавинообразный процесс. Ждущий мультивибратор вернётся к исходному состоянию. Конденсатор C вновь зарядится почти до полного напряжения питания. Это состояние ждущий мультивибратор будет сохранять до прихода следующего запускающего импульса.

Ждущий мультивибратор с эмиттерной связью

Длительность импульса, формируемого на коллекторе транзистора VT2, описывается приближенным соотношением:

$$t_u \approx 0,7 * C * (R_3 + R_6).$$

Время восстановления зависит от времени заряда конденсатора C и находится из соотношения

$$t_v \approx 3 * C * (R_{к1} + R_3).$$

Для нормальной работы необходимо, чтобы к приходу следующего запускающего импульса, процесс восстановления закончился. Отсюда следует, что период запускающих импульсов не может быть менее

$$T = t_u + t_v.$$

Амплитуда выходного импульса

$$U_m = E_n * R_{к2} / (R_{к2} + R_3).$$