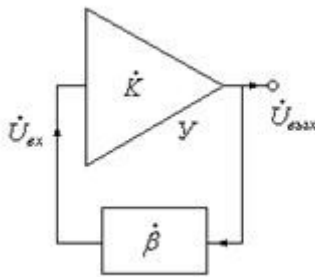


## Лекция. Генераторы электрических сигналов



Структурная схема простейшего генератора, изображена на рис.

Цепь положительной обратной связи  $\beta$  обычно выполняется на пассивных элементах и поэтому имеет потери. Затухание сигнала в цепи обратной связи компенсируется усилением, которое обеспечивает усилитель  $U$ . При включении питания в схеме возникают колебания, обусловленные зарядом ёмкостей и индуктивностей, переходными процессами в транзисторах или в операционных усилителях (ОУ). Эти колебания поступают на вход

усилителя в виде сигнала  $U_{вх}$ , пройдя усилитель, появляются на

его выходе в виде сигнала  $U_{вых} = KU_{вх}$ . С выхода усилителя колебания через цепь положительной обратной связи вновь поступают на вход усилителя, поэтому  $U_{вх} = U_{вых}\beta$  или  $U_{вх}(1 - K\beta) = 0$ , где  $K$  - комплексное значение коэффициента усиления;  $\beta$  - коэффициент передачи цепи обратной связи.

Напряжение на входе усилителя, а, следовательно, и на его выходе может иметь конечное значение только при выполнении условия  $1 - K\beta = 0$ , откуда находим условие возбуждения колебаний  $K\beta = 1$ .

Условие возникновения колебаний распадается на два условия, которые принято называть **условиями баланса амплитуд и фаз**:

$$|K\beta| = 1$$

$\varphi + \phi = 2\pi$ , где  $\varphi$  - сдвиг по фазе для усилителя;  $\phi$  - сдвиг по фазе для цепи обратной связи.

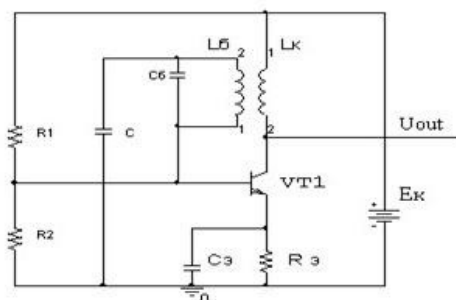
Выражение  $|K\beta| = 1$  называют условием **баланса амплитуд**, а выражение  $\varphi + \phi = 2\pi$  - условием **баланса фаз**.

Если баланс амплитуд и баланс фаз выполняется на одной частоте, то в генераторе возникает одночастотные (гармонические) по форме колебания. Если баланс амплитуд и баланс фаз выполняются одновременно на многих частотах, то в генераторе возникают колебания с разными частотами. Форма таких сигналов отличается от гармонических.

Генераторы различаются **по форме выходного сигнала**: - синусоидальных, гармонических колебаний (сигналов); - прямоугольных импульсов (мультивибраторы, тактовые генераторы); - функциональный генератор прямоугольных, треугольных и пр. импульсов; - генератор линейно-изменяющегося напряжения (ГЛИН, ГПН); - генератор шума

Независимо от формы выходного напряжения любой генератор может работать в одном из двух режимов: в режиме автоколебаний и в режиме запуска внешним сигналом.

**Генератор гармонических колебаний** представляет собой усилитель с положительной обратной связью. Цепи положительной обратной связи выполняют две функции: **сдвиг сигнала по фазе для получения петлевого сдвига близкого к  $n \cdot 2\pi$  и фильтра, пропускающего нужную частоту**. Условие баланса фаз выполняется на одной единственной частоте, на которой также выполняется условие баланса амплитуд.



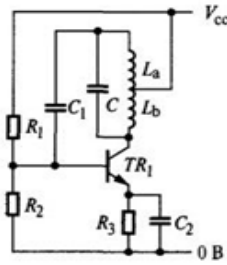
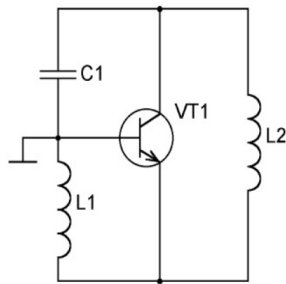
Схемы генераторов, в которых часть выходного сигнала передается в цепь базы через индуктивный или емкостной делитель, называются **трехточечными**.

Исторически первый LC-генератор был изобретен Мейснером в 1913 году (немецкое общество беспроводного телефона) и затем усовершенствован Роундом (фирма Маркони). В нём использовалась индуктивная обратная связь. Первые LC-генераторы имели резонансный контур в цепи обратной связи, а в

выходную цепь усилителя включалась катушка индуктивности. Эта катушка, с одной стороны, играла роль нагрузки усилителя, а с другой — передавала часть энергии в цепь обратной связи.

При подаче напряжения питания в колебательном контуре появятся колебания с частотой

$\omega_0 = 1/\sqrt{L_B C_B}$ , которые при отсутствии положительной обратной связи должны прекратиться из-за активных потерь энергии в LC-контуре, определяемых величиной  $r_k$  активного сопротивления индуктивной катушки. Появившийся в контуре переменный ток  $i_b$  усиливается транзистором. Эти колебания через катушку  $L_k$ , индуктивно связанную с  $L_b$ , вновь возвращаются в колебательный контур. Размах колебаний постепенно нарастает до определенной величины, так как транзистор представляет собой ограничивающее устройство, не позволяющее коллекторному току возрастать бесконечно.

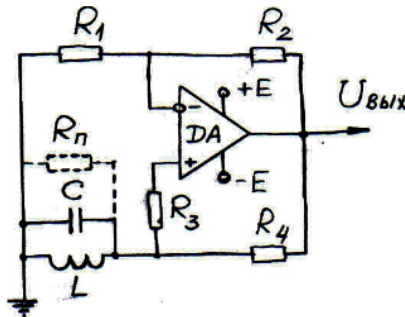


В LC-генераторе, выполненном по индуктивной трехточечной схеме (рис. а), резонансный контур (селективный элемент) образован включенными последовательно катушками  $L_1$ ,  $L_2$  и подключенным параллельно им конденсатором  $C_1$ . Этот контур включен в цепь коллектора транзистора  $VT_1$ .

Сигнал обратной связи снимается с

точки соединения катушек  $L_1$ ,  $L_2$  и подается в цепь эмиттера, который является входным электродом активного элемента. Таким образом, селективный элемент оказывается подключенным к транзистору в трех точках - **трехточка Хартли**.

Генератор колебаний можно создать и с использованием **операционного усилителя**. Одна из схем такого генератора (рис.б) содержит усилитель, цепь отрицательной обратной связи —  $R_1$ ,  $R_2$ , цепь частотно-избирательной положительной обратной связи —  $R_4$  и параллельный LC-колебательный контур. Цепь положительной обратной связи имеет максимум коэффициента передачи на резонансной частоте  $\omega_0 = \sqrt{LC}^{-1}$



**Кварцевые генераторы** получили свое название от кристалла кварца, который используется в генераторе вместо колебательного контура. Добротность колебательного контура на кварце и его стабильность настолько велики, что достичь таких значений в схемах генераторов LC- или RC-типа просто невозможно. Нестабильность частоты RC-генераторов имеет значение около 0,1%, LC-генераторов — около 0,01%, а кварцевый генератор имеет нестабильность частоты от  $10^{-4}$  до  $10^{-5}\%$ .

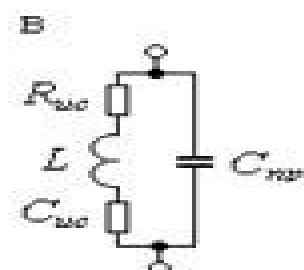
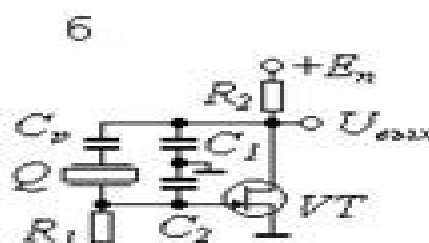
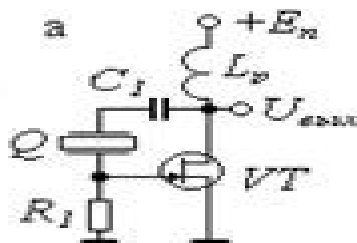
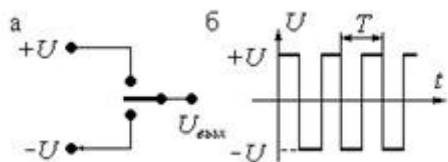


Рис. Кварцевый генератор по схеме Пирса (а), кварцевый генератор по схеме Колпитца (б) и схема замещения кварца (в). В схеме Пирса кварц включается между стоком и затвором полевого транзистора  $VT$ , т. е. в цепь отрицательной обратной связи. В результате чего схема становится похожей на емкостную трехточку. На частоте резонанса кварц вносит дополнительный фазовый сдвиг на  $180^\circ$  и обратная связь становится положительной. В схеме Колпитца (б) для облегчения возбуждения применен емкостной делитель на элементах  $C_1$  и  $C_2$ .

Конструктивно кварцевый контур выполняется в виде кварцевой пластины с нанесенными на нее электродами. Эквивалентная схема кварцевого контура приведена на рис. 6, где:  $L$  — эквивалентная индуктивность кварца,  $R_{ис}$  — сопротивление потерь,  $C_{ис}$  — последовательная емкость,  $C_{пр}$  — параллельная емкость. Такой контур имеет две резонансные частоты: резонанса напряжений  $\omega_H \approx (LC)^{-1/2}$  и резонанса токов  $\omega_T \approx (LC)^{-1/2}$ , причем  $\omega_H < \omega_T$ . Эти резонансные частоты расположены очень близко друг к другу и отличаются всего примерно на 1%.

**Генераторы импульсных сигналов** предназначены для получения колебаний резко несинусоидальной формы, называемых **релаксационными**. Длительность импульса определяется *временем исчезновения* (по латыни *relaxatio*) электрического поля в одном из конденсаторов. Для таких колебаний характерно наличие участков сравнительно медленного изменения напряжения и



участков, на которых напряжение изменяется скачкообразно. Генератор прямоугольных импульсов (ГПИ) работает как автоколебательный ключ, непрерывно переключающийся взад и вперед между двумя уровнями постоянного напряжения без использования внешнего сигнала запуска. Для импульсных генераторов характерно

наличие внешней или внутренней **положительной обратной связи** и скоротечный (лавинообразный) процесс перехода активных элементов генератора из одного крайнего (закрытого, открытого) в другое (открытое, закрытое) состояние.

**В импульсной технике вычислительных устройств** чаще всего используются генераторы прямоугольных и пилообразных импульсов, а также их разновидности, с разными соотношениями длительности импульсов и их фронтов - трапецеидальные и треугольные.

Импульсные генераторы могут работать в трех основных режимах: автоколебательном, ждущем и в режиме синхронизации.

**Автоколебательные генераторы** импульсов после самовозбуждения генерируют последовательность импульсов, параметры которых (амплитуда, частота повторения, длительность, скважность) определяются только параметрами элементов схемы генератора.

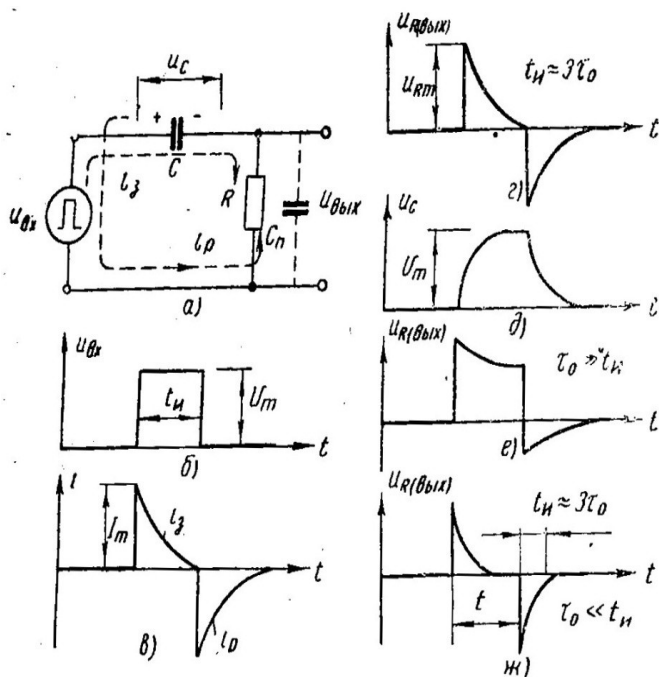
**Ждущие** генераторы генерируют импульсы, период повторения которых определяется периодом повторения запускающих импульсов, а параметры каждого импульса (амплитуда, длительность, форма) зависят только от параметров схемы генератора.

**В режиме синхронизации** генератор вырабатывает импульсы, частота которых равна или кратна частоте синхронизирующего сигнала. Поэтому такие генераторы часто используются в качестве делителей частоты. Кроме того, иногда генерируются нескольких импульсных последовательностей, сдвинутых по фазе друг относительно друга на некоторую произвольную величину, в общем случае не равную  $180^\circ$ . Такие генераторы называются многофазными.

В качестве времязадающих используются емкостно-резисторные или индуктивно-резисторные **RC — цепи**, линейные формирующие цепи, линии задержки и колебательные контуры.

**Действие импульсного напряжения на цепь RC.** Цепи из элементов RC в различных комбинациях могут быть использованы для преобразования формы импульсов. В зависимости от того, с какого элемента снимается сигнал (с R или C), цепь называют **дифференцирующей** или **интегрирующей**. Цепь, показанная на рис. а называется **дифференцирующей**, поскольку при  $\tau_0 < t_{и}$  выходное напряжение пропорционально производной от входного и служит для получения кратковременных остроконечных импульсов напряжения, часто используемых для запуска формирующих устройств. Чем меньше  $\tau_0$ , тем больше скорость изменения напряжения и тем острее будут импульсы напряжения на выходе дифференцирующей цепи.

Предположим, что на входе цепи, содержащей конденсатор C и резистор R (рис. а), действует последовательность прямоугольных импульсов (рис. б). В момент появления на входе RC цепи переднего фронта импульса в ней потечет наибольший ток  $I_m = U_m / R$  (рис. в).



По мере заряда конденсатора результирующее напряжение в схеме  $u_p = U_m - u_c$  уменьшается, соответственно уменьшается зарядный ток  $i_a$ . Уменьшение тока происходит по экспоненциальному закону. Ток заряда  $i_3$  создает на резисторе  $R$  падение напряжения (рис. г). С уменьшением тока экспоненциально снижается напряжение на резисторе  $R$ . Воздействие прямоугольного импульса на дифференцирующую цепь: а — схема, б — форма импульса на входе, в — форма тока в цепи, г — форма напряжения на резисторе, д — то же, на конденсаторе, е — форма импульса на выходе при  $\tau_0 \geq t_{и}$ , ж — то же при  $\tau_0 \leq t_{и}$ . Напряжение на конденсаторе  $u_c$  по мере его заряда экспоненциально возрастает (рис. д) и к некоторому моменту достигает наибольшего значения  $U_m$  после чего остается постоянным на все время

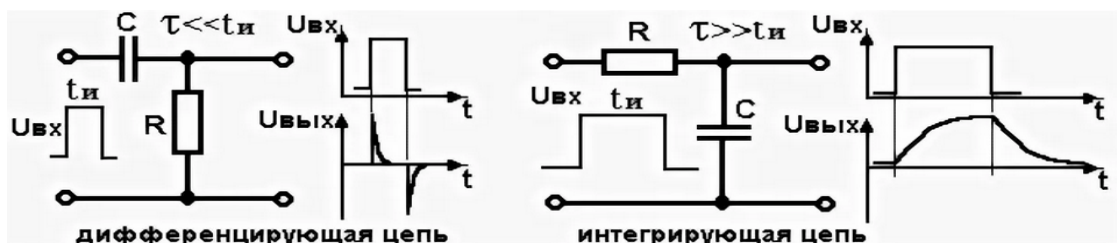
действия плоской вершины входного импульса.

Время, в течение которого напряжение на  $C$  и  $R$  достигает амплитудного значения, зависит от величины сопротивления резистора  $R$  и емкости конденсатора  $C$ . Чем меньше эти величины, тем быстрее заканчивается переходный процесс. Оценку длительности переходного процесса ведут с помощью постоянной времени цепи  $\tau_0 = RC$ . Практически переходные процессы в схеме заканчиваются по истечении промежутка времени  $t = (2,3-3)\tau_0$ .

Форма выходного напряжения зависит от значения  $\tau_0$  (рис. г, е, ж). При  $\tau_0 \gg t_{и}$  (рис. е) конденсатор за время действия входного импульса не успевает разрядиться, и форма выходного сигнала лишь незначительно отличается от формы входного. С такими параметрами ( $\tau_0 \gg t_{и}$ ) цепь часто используют в схемах импульсных устройств как **разделительную** между усилительными каскадами (в качестве  $R$  используется сопротивление входа следующего каскада). При  $\tau_0 < t_{и}$  заряд и разряд конденсатора происходят за время, немного меньшее длительности импульса, поэтому выходное напряжение имеет вид двух узких разнополярных импульсов (рис. ж).

Если в цепи  $RC$  выходное напряжение снимается с емкости (рис. а), то при  $\tau_0 \gg t_{и}$  выходной сигнал пропорционален интегралу от входного, и такая цепь называется **интегрирующей**.

Если постоянная времени  $RC$  цепи выбрана равной или больше длительности прямоугольного импульса (рис. б) напряжения на входе ( $\tau_0 \gg t_{и}$ ), то на выходе  $RC$  цепи возникает импульс с растянутым фронтом и спадом (рис. в). При воздействии на вход такой цепи кратковременного импульса напряжения на выходе образуется более широкий импульс.



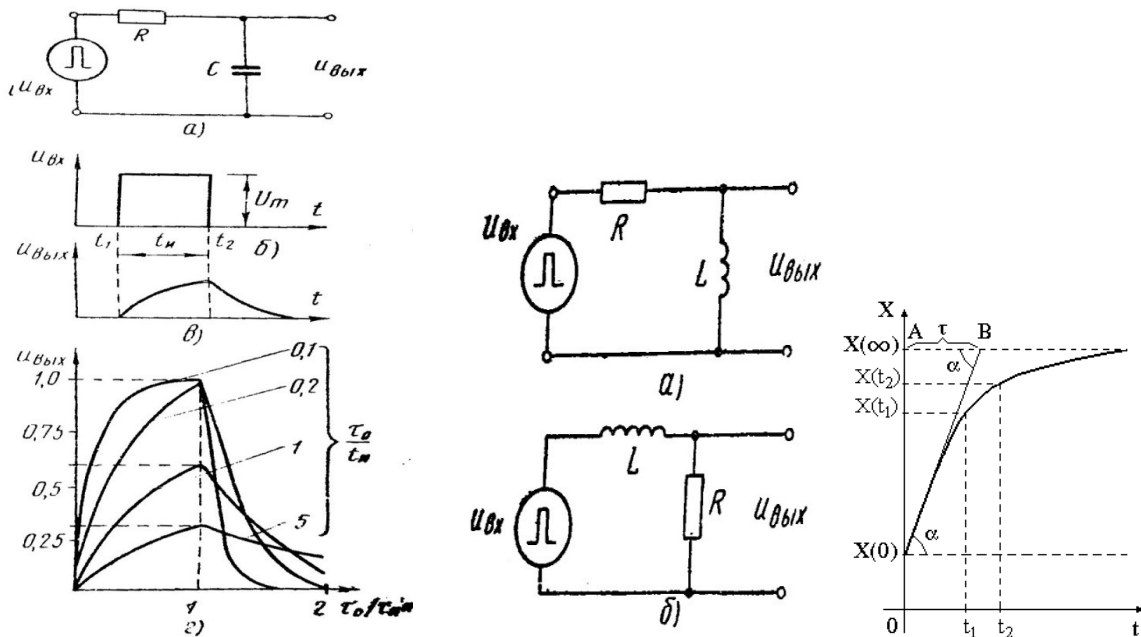


Рис. Воздействие прямоугольного импульса на интегрирующую цепь: а — схема, б — форма импульса на входе, в — то же, на выходе, г — зависимость формы импульса от соотношения  $\tau_0/t_u$ . Цепи на  $RL$  элементах: а — дифференцирующая, б — интегрирующая рис.3 (убывающая или нарастающая экспонента).

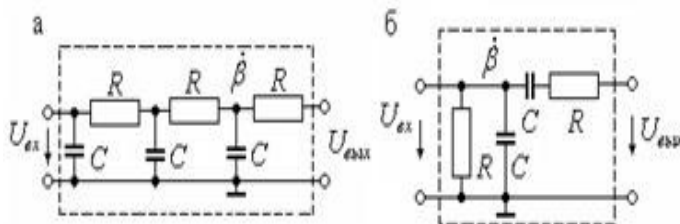
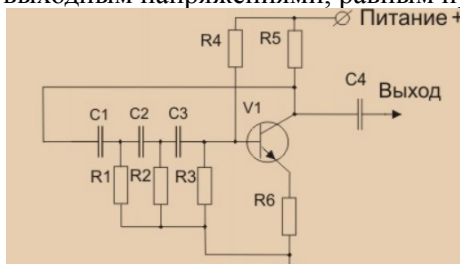
**Дифференцирование и интегрирование** может также осуществляться с помощью цепей  $RL$ . Поскольку реактивное действие индуктивности противоположно емкости, то в  $RL$ -цепях при дифференцировании выходной сигнал снимается с индуктивности (рис. а), а при интегрировании — с резистора (рис. б). Цепи  $RL$  применяют сравнительно редко, так как они содержат дорогую motочную деталь -  $L$ .

*\*) Переходные процессы в простейших линейных цепях, т.е. в цепях  $RL$  или  $RC$  описываются дифференциальным уравнением первого порядка:*

$$\tau \frac{dx(t)}{dt} + x(t) = y(t), \text{ где } x(t) - \text{напряжение или ток в схеме, } y(t) - \text{внешнее воздействие.}$$

Решение этого уравнения для случая  $y(t) = \text{const}$  имеет вид:  $x(t) = x(\infty) - [x(\infty) - x(0)]e^{-\frac{t}{\tau}}$ , где  $t$  - текущее время,  $x(t)$  - напряжение или ток в схеме,  $x(\infty)$  - конечное значение  $x(t)$  при  $t \rightarrow \infty$ ,  $x(0)$  - начальное значение  $x(t)$  при  $t = 0$ . Характер изменения функции  $x(t)$  представлен на рис.в (убывающая или нарастающая экспонента).

**RC-генераторы гармонических сигналов.** Генераторы с  $LC$ -контурами нашли широкое применение на высокой частоте, однако их применение на низкой частоте осложняется низким качеством и большими габаритами катушек индуктивности. В связи с этим низкочастотные генераторы обычно используют различные  $RC$ -цепи в звеньях положительной обратной связи. Эти  $RC$ -цепи обычно имеют квазирезонансные характеристики со сдвигом фаз между входным и выходным напряжениями, равным нулю или  $180^\circ$ .



Первая цепь (а) состоит из трех фазосдвигающих звеньев, каждое из которых обеспечивает сдвиг по фазе на  $60^\circ$ . В результате выходное напряжение будет сдвинуто по отношению к входному



на  $180^\circ$ . Для возбуждения колебаний усилитель также должен иметь сдвиг по фазе, равный  $180^\circ$ , т. е. должен быть инвертирующим.

Вторая цепь называется **мостом Вина** и на квазирезонансной частоте обеспечивает сдвиг по фазе, равный нулю, поэтому для возбуждения колебаний усилитель должен быть неинвертирующим. В качестве активных элементов используются биполярные транзисторы, полевые транзисторы, ОУ в интегральном исполнении RC генератор  $f = 1/2\pi\sqrt{6RC}$ .

Мост Вина состоит из двух RC-звеньев: - первое звено состоит из последовательного соединения R и C и

$$Z_1 = R + \frac{1}{j\omega C} = \frac{1 + j\omega CR}{j\omega C}$$

имеет сопротивление

- второе звено состоит из параллельного соединения таких же R и C и имеет сопротивлени

$$Z_2 = \frac{R \frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{R}{1 + j\omega CR}$$

Коэффициент передачи звена положительной обратной связи определяется выражением

$$\beta = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{1}{1 + Z_1/Z_2}, \quad \beta = \frac{j\omega CR}{1 - \omega^2 C^2 R^2 + 3j\omega CR}$$

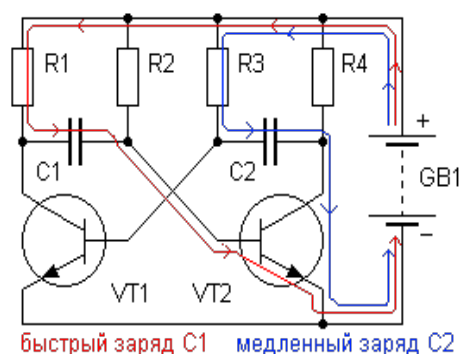
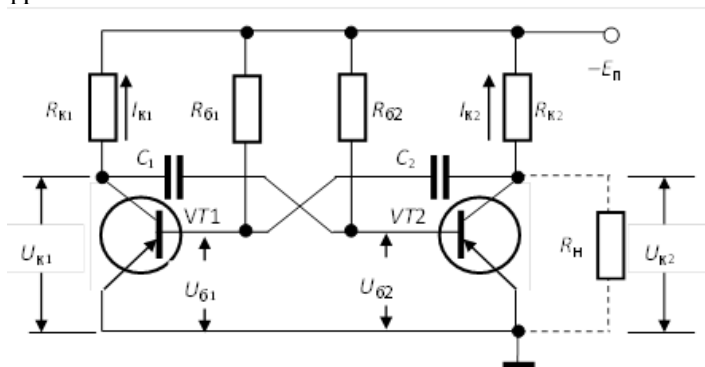
откуда после подстановки  $Z_1$  и  $Z_2$ , найдем  $1 - (\omega CR)^2 = 0$ , то фазовый сдвиг будет равен нулю, а  $\beta = 1/3$ . В этом случае частоту генератора можно будет определить по формуле  $\omega = (CR)^{-1}$

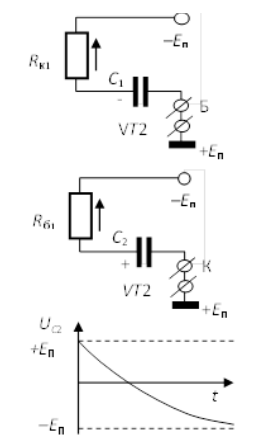
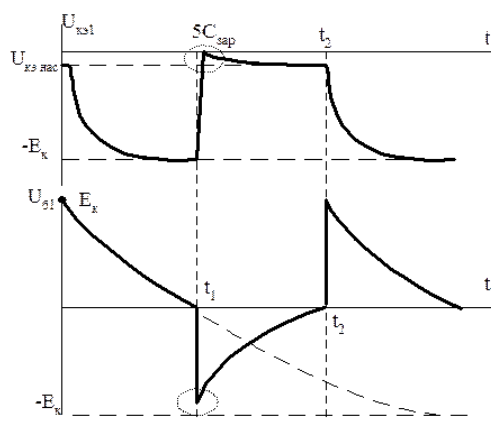
## Мультивибраторы

**Автоколебательным мультивибратором (МВ)** называется устройство, которое периодически находится в одном из двух квазиустойчивых состояний, переход в которые происходит регенеративно. Мультивибратор представляет собой генератор колебаний почти прямоугольной формы на основе двухкаскадного усилителя с положительной обратной связью, в котором выход каждого каскада соединен с входом другого. Название (**мульти**) отражает тот факт, что в спектральный состав входит большое число гармонических составляющих.

Колебания представляют собой смену квазиустойчивых состояний, в которых каждый транзистор попеременно находится в открытом состоянии, характеризующимся напряжением на базе  $U_6 > 0,7$  В, напряжением на коллекторе  $U_k = (0,1 - 0,2)$  В и током коллектора  $I_k = V_k / R_k$ , и в закрытом состоянии, характеризующимся напряжением на базе  $U_6 < 0,6$  В, напряжением на коллекторе  $U_k = V_k$ , токе коллектора  $I_k = 0$ . *Положительная обратная связь* существует при переходе транзистора из режима насыщения в режим отсечки и наоборот, то есть в активном режиме работы транзисторов

Переход транзисторов из одного состояния в другое определяют времязадающие цепочки  $R_{61} C_1$  и  $R_{62} C_2$  и соотношение напряжений  $V_6$  и  $V_k$ . Открытие (закрытие) одного транзистора передается на базу другого с некоторой задержкой, а положительная обратная связь формирует короткие фронты.

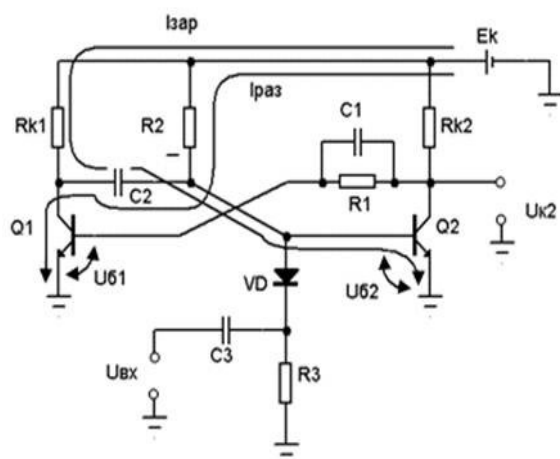




Регулировать частоту колебаний мультивибратора можно, изменяя постоянные времени  $\tau_1$  и  $\tau_2$  или значение напряжения смещения  $V_b$ . Математические модели мультивибратора отличаются от реальных необходимостью введения разбаланса в плечах, что бы колебания возникли, в редакторе начальных условий.

### Ждущий мультивибратор.

Ждущие генераторы прямоугольных импульсов предназначены для формирования прямоугольного импульса заданной длительности при поступлении на вход короткого запускающего импульса. Такие генераторы имеют одно устойчивое и одно квазиустойчивое состояния, переход в которые осуществляется регенеративно.

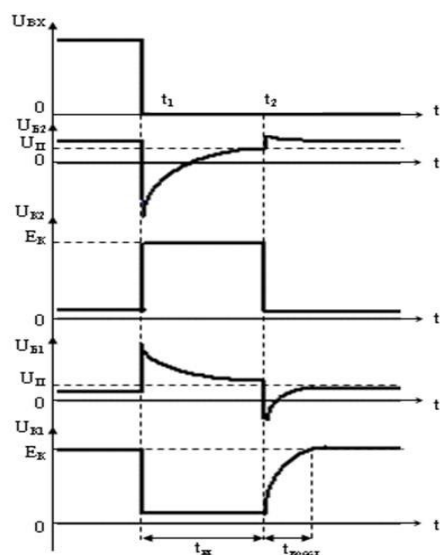


### Исходное устойчивое состояние.

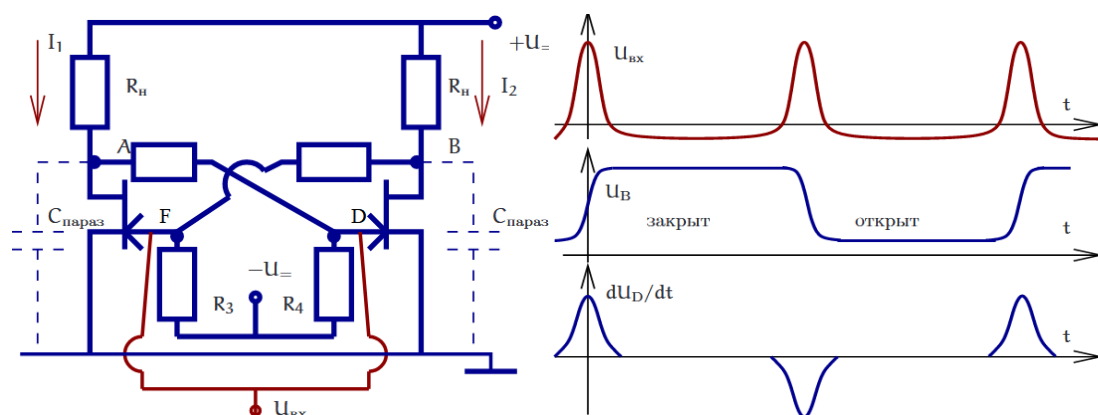
Транзистор  $Q2$  открыт, а  $Q1$  закрыт. Транзистор  $Q2$  удерживается в открытом состоянии током  $I_{Б2}$ , создаваемым источником  $E_k$  и втекающим в базу транзистора  $Q2$  через резистор  $R2$ . Этот ток равен:  $I_{Б2} = (E_k - U_{БЭ\text{ на с } 2}) / R2$ . Сопротивление  $R2$  выбрано таким, чтобы ток базы транзистора  $Q2$  был больше тока базы на границе насыщения, транзистор  $VT2$  насыщен, напряжение на его коллекторе  $U_{к2}$  имеет небольшое остаточное значение. При этом транзистор  $Q1$  закрыт, напряжение на его базе  $U_{Б1}$  меньше порога открывания  $U_b$ , а конденсатор  $C2$  заряжен до напряжения  $U_{C2} \approx E_k - U_{БЭ\text{ на с }}$  (слева плюс, справа минус) через  $R_{к1}$  и базовый переход транзистора  $Q2$ .

### Запуск.

В момент  $t_1$  на базу  $Q2$  поступает импульс тока, формируемый цепью запуска. Под действием заднего фронта этого импульса транзистор  $VT2$  закрывается, напряжение  $U_{к2}$  на его коллекторе нарастает до значения, близкого к  $E_k$ . Это напряжение существенно превышает порог открывания  $U_b$  транзистора  $Q1$ , последний открывается и входит в насыщение, что обеспечивается соответствующим выбором сопротивления  $R1$ . Конденсатор  $C2$  перезаряжается частью коллекторного тока транзистора  $Q1$ , протекающего по цепи: конденсатор  $C2$ , резистор  $R2$ , источник  $E_k$  так, что бы справа появился плюс, слева – минус). В соответствии с изменением напряжения на конденсаторе меняется и напряжение  $U_{Б2}$  на базе транзистора  $Q2$ . В момент времени  $t=t_2$  напряжение на перезаряжающемся конденсаторе  $C2$  достигает порогового значения ( $0.75V$ ), транзистор  $Q2$  открывается и схема возвращается в состояние ожидания.

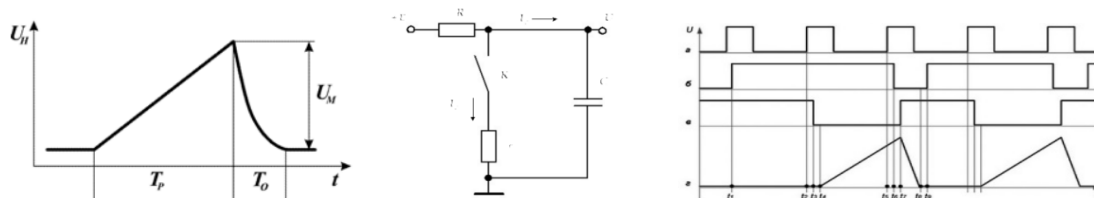


**Триггер** – система с двумя устойчивыми положениями равновесия (основной элемент ЭВМ). Это *модифицированный мультивибратор*: напряжение питания понижено так, что автоколебаний нет. Подбором параметров можно добиться двух устойчивых положений равновесия (1-ый транзистор открыт, 2-ой закрыт, или наоборот). Импульс входного напряжения перебрасывает триггер в другое состояние.

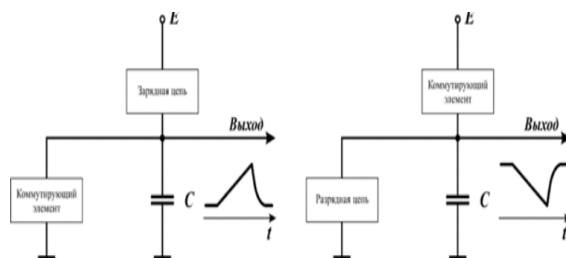


**Генераторы пилообразных импульсов (ГПИ)** являются одной из наиболее широко применяемых импульсных схем. Эти устройства необходимы для развертки сигналов в телевизионных и осциллографических трубках, преобразования аналоговых сигналов в число импульсов (АЦП) в измерительных и преобразовательных устройствах, формирования временного сдвига импульса в зависимости от величины входного сигнала в фазоимпульсных устройствах, широтно-импульсной модуляции сигналов в преобразовательной технике.

Линейно изменяющимся (или пилообразным) называется напряжение, которое в течение рабочей стадии  $T_{\text{р}}$  изменяется линейно от некоторого начального уровня  $U_0$  до предельного значения  $U_1$ , а затем в течение определенного промежутка времени, называемого временем восстановления  $T_{\text{в}}$ , возвращается к исходному значению. Для линейно изменяющегося напряжения характерно условие  $T_{\text{р}} \gg T_{\text{в}}$ .

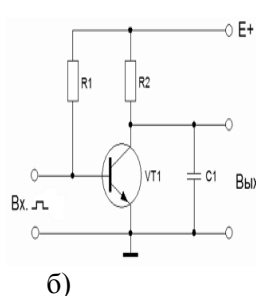


Независимо от практической реализации все типы ГПИ можно представить в виде единой эквивалентной схемы, основанной на применении интегрирующей **RC**-цепи совместно с ключом, осуществляющим периодическую коммутацию цепи. В течение рабочей стадии происходит процесс заряда или разряда конденсатора в цепи с относительно большим сопротивлением **R**, а в стадии восстановления - разряда или заряда конденсатора **C** в цепи с малым сопротивлением.

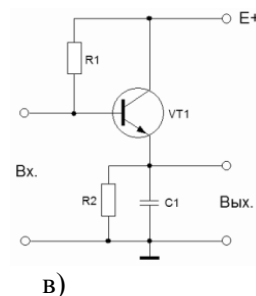


Схематическое изображение генераторов пилообразного напряжения: линейно-растущего (слева) и линейно-падающего (справа).

Рис. 2 а)



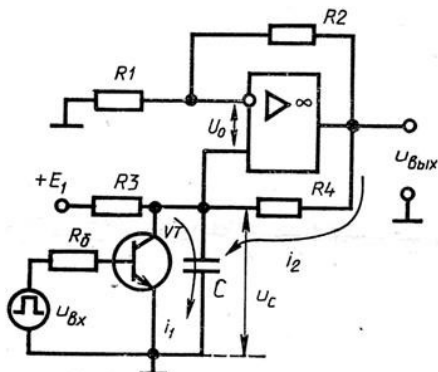
б)



в)



В схеме б) конденсатор заряжается через  $R_2$ , а разряжается мгновенно через открытый транзистор. Лучшие параметры генератора обеспечивают зарядные (или разрядные) схемы с источниками (генераторами) тока. Ещё лучшие параметры обеспечивают генераторы пилообразного напряжения, в которых применяются обратные связи в зарядных (или разрядных) цепях. В схеме в) конденсатор  $C_1$  заряжается постоянным током эмиттера, а разряжается с момента падения напряжения на базе через сопротивление  $R_2$  с  $\tau_r$ .



**ГПН с повышенной линейностью.** ГПН с малым значением коэффициента нелинейности ( $\epsilon < 1\%$ ) и его незначительной зависимостью от сопротивления нагрузки создаются на основе интегральных ОУ. В ГПН на ОУ (рис. 11.15) высокая линейность пилообразного напряжения достигается действием положительной ОС в цепи зарядки конденсатора  $C$ .

Рис. Схема ГПН на базе интегрального ОУ

Во время положительного импульса транзистор  $VT$  открыт и конденсатор быстро разряжается через малое сопротивление насыщенного транзистора. В паузах между входными импульсами

транзистор закрыт и конденсатор заряжается током  $i_1$  от источника  $E_1$  через резистор  $R_3$ .

Напряжение  $u_C$ , образуемое на конденсаторе, поступает на неинвертирующий вход ОУ, работающего в линейном режиме с коэффициентом усиления по неинвертирующему входу  $K^{(+)}_u = 1 + (R_2/R_1)$ . В результате на выходе ОУ создается напряжение  $u_{\text{вых}} = u_C K^{(+)}_u$ , а на резисторе  $R_4$  — напряжение, равное  $u_{R4} = u_{\text{вых}} - u_C = u_C K^{(+)}_u - u_C = u_C R_2/R_1 = u_C K^{(-)}_u$ . Напряжение  $u_{R4} = u_C R_2/R_1$  создает ток  $i_2$ , который протекает через конденсатор  $C$  в том же направлении, что и ток  $i_1$ . Следова-

тельно, ток зарядки конденсатора в паузах между входными импульсами  $i_{C \text{ зар}} = i_1 + i_2$ . По мере зарядки конденсатора ток  $i_1$  уменьшается, а напряжения на конденсаторе и на выходе ОУ увеличиваются. Если  $K^{(-)}_u = R_2/R_1 \gg 1$ , то напряжения на резисторе  $R_4$  и протекающий через него ток  $i_2$  при увеличении  $u_C$  также увеличиваются. Увеличение тока  $i_2$  при соответствующем подборе коэффициента усиления может полностью компенсировать уменьшение тока  $i_1$ , и зарядка конденсатора будет происходить постоянным током, чем обеспечивается высокая линейность пилообразного напряжения.

## Блокинг-генераторы

Блокинг-генератор представляет собой однокаскадный релаксационный генератор кратковременных импульсов с сильной индуктивной положительной обратной связью, создаваемой импульсным трансформатором. Вырабатываемые блокинг-генератором импульсы имеют большую крутизну фронта и среза и по форме близки к прямоугольным. Длительность импульсов может быть в пределах от нескольких десятков наносекунд до нескольких сотен микросекунд. Обычно блокинг-генератор работает в режиме большой скважности — от нескольких сотен до десятков тысяч.

Блокинг-генератор может работать в автоколебательном режиме, режиме внешней синхронизации или в ждущем режиме. Схема с общей базой более стабильна по отношению к изменению параметров транзистора, а схема с общим эмиттером обеспечивает меньшую длительность фронта импульсов.

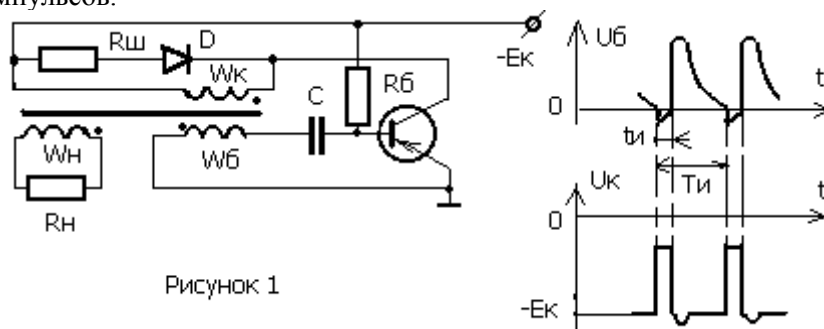


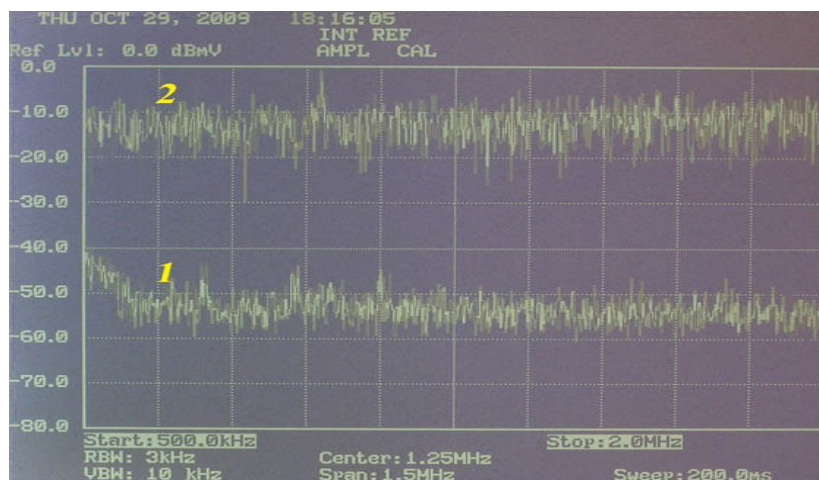
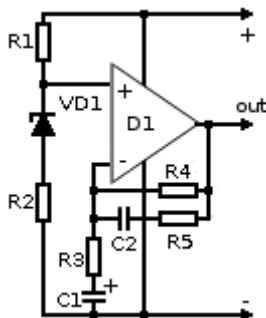
Рисунок 1

В первой стадии, занимающей большую часть периода колебаний, транзистор заперт, конденсатор  $C$  имеет  $+$  на базе и медленно разряжается через большое сопротивление резистора  $R_B$ , транзистор заперт.

Когда напряжение на базе  $U_B$  достигнет примерно «нулевого» уровня, транзистор отпирается и через коллекторную обмотку трансформатора  $W_K$  начинает протекать ток. Отрицательное напряжение, возникшее в базовой обмотке с противофазным включением, приведет к дальнейшему увеличению коллекторного тока и тем самым – к дальнейшему увеличению отрицательного напряжения на базе и т.д. Развивается лавинообразный процесс увеличения коллекторного тока и напряжения на базе  $U_B$  – транзистор отпирается. Это **прямой блокинг** – процесс, который происходит очень быстро, и за это время напряжение на конденсаторе и энергия магнитного поля в сердечнике трансформатора практически не изменяются. Формируется фронт импульса, а транзистор переходит в режим насыщения, утрачивает свои усилительные свойства, положительная обратная связь нарушается. Начинается процесс формирования вершины импульса, во время которого рассасываются неосновные носители, накопленные в базе, а конденсатор  $(-)$  разряжается базовым током. Когда напряжение на базе достигнет активного уровня, транзистор выходит из режима насыщения, восстанавливаются его усилительные свойства. Уменьшение тока базы вызывает уменьшение коллекторного тока. Вновь возникает лавинообразный процесс (**обратный блокинг**) в результате которого транзистор запирается, формируя спад импульса.

**Генератор шума.** Особенность сигнала такого генератора в его хаотической форме и сравнительно широком диапазоне частот — от сотен герц до десятков мегагерц.

**Источник шума** (в диапазоне 10 Гц – 30 МГц) - стабилитрон с током через стабилитрон около 2% от минимального тока стабилизации. Усилитель – ОУ.  $C1$  ограничивает усиление снизу частотного диапазона,  $C2$  – сверху (исключает возможность самовозбуждения). Резисторы  $R3, R4$  обеспечивают усиление ( $R4=1M, R3=1k, K_u=1000$ ).



«**Цифровой**» шум представляет собой временной случайный процесс, близкий по своим свойствам к процессу физических шумов. Цифровая последовательность двоичных символов представляет собой последовательность прямоугольных импульсов псевдослучайной длительности с псевдослучайными интервалами между ними. Для получения шумового цифрового сигнала в качестве источника шума применяется генератор псевдослучайной последовательности (ПСП), основой построения которого являются регистры сдвига с обратными связями на сумматорах по модулю 2. Период повторения всей последовательности значительно превышает наибольший интервал между импульсами.

