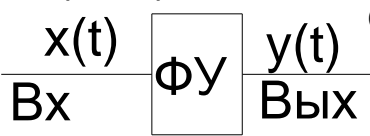


## Нелинейные цепи.

- раздел, изучающий преобразование сигналов от входного по форме, величине, спектра (из-за того что параметры элементов зависят от тока).



**Особенность нелинейных цепей.** Есть некий функциональный узел, у которого есть сигнал на входе и на выходе. Любой функциональный узел можно описать системой ДУ:

$$a_0 \frac{d^n y}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_n y = b_0 \frac{d^m x}{dt^m} + b_1 \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \dots + b_m x(1).$$

По виду уравнений все цепи делятся на: линейные, параметрические, нелинейные. **Линейные цепи** – описываются линейными ДУ (1), в которых все  $a_j, b_j = \text{const}$ ,  $a_j, b_j$  зависят от элементов цепи ( $R, C, L = \text{const}$ ).

**Параметрические цепи** – описываются ДУ (1), в которых хотя бы один из коэффициентов  $a_j = a_j(t), b_j = b_j(t)$  есть функции времени.

**Нелинейные цепи** – описываются нелинейными ДУ (1), в которых хотя бы один из коэффициентов  $a_j = f(x, dx/dt \dots), b_j = f(x, dx/dt \dots)$ . В линейных цепях действует принцип суперпозиции, но в нелинейных цепях принцип не действует, т.е. нелинейные уравнения описываются уравнением типа  $y = ax^2$ .

Пусть  $x_{\text{вх}} = x_1 + x_2$ , тогда выходной сигнал  $y = ax_1^2 + ax_2^2 + 2ax_1x_2$ . в нелинейных цепях нельзя использовать спектральные методы анализа и с помощью интеграла Дюамеля. Пусть  $x_1 = A \cos \omega t, x_2 = B \cos \Omega t$ , тогда на выходе:  $y = 1/2 A^2 a(1 + \cos 2\omega t) + 1/2 B^2 a(1 + \cos 2\Omega t) + aAB[\cos(\omega + \Omega)t + \cos(\omega - \Omega)t]$  изменение спектра, ДУ нельзя решить.

### АПРОКСИМАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ.

1. Графический метод анализа нелинейных цепей (простые цепи, простые воздействия, малая точность).
2. аналитический (общность, точность, можно анализировать сложные сигналы и цепи, но требуется аналитическое выражение).

**Аппроксимация** – это получение аналитического выражения характеристики нелинейного элемента, заданного графиком или таблицей. Аппроксимация обычно производится только на рабочем участке. Задачи аппроксимации: выбор аппроксимирующей функции (степенной полином, exp, тригонометрические) и определение коэффициентов аппроксимации. Требования к функциям: точность, краткость, простота, проведение математических операций. Коэффициенты аппроксимации выбираются из условий точности аппроксимации:

1. критерий равномерного приближения:  $|f'(x) - f(x)| \leq \epsilon$ .
2. точечного приближения  $f'(x)$  должна совпадать с  $f(x)$  в ряде точек.

### ПОЛИНОМИНАЛЬНАЯ АППРОКСИМАЦИЯ.

Любую функцию можно описать полиномом:  $i = a_0 + a_1 U + a_2 U^2 + \dots + a_n U^n$ ;

$$i_1 = a_0 + a_1 U_1 + a_2 U_1^2 + \dots + a_n U_1^n$$

$$i_2 = a_0 + a_1 U_2 + a_2 U_2^2 + \dots + a_n U_2^n$$

$$i_{n+1} = a_0 + a_1 U_{n+1} + a_2 U_{n+1}^2 + \dots + a_n U_{n+1}^n$$

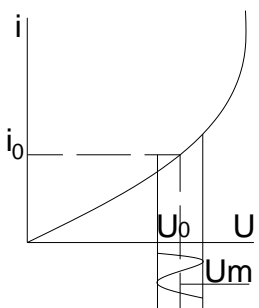
$n+1$  уравнений, из этих уравнений можно определить коэффициенты аппроксимации  $a_i$ .

Рассмотрим диод, он имеет квадратичную характеристику

$i = a_0 + a_1 U + a_2 U^2$ . Выбираем рабочую точку, удобно:

$i = a_0 + a_1(U - U_0) + a_2(U - U_0)^2$ . Подаем сигнал, например

синусоиду  $U_{\text{вх}} = U_m \cos \omega t$  с амплитудой  $U_m$ . Ставим в уравнения  $U = U_0 + U_m$ ;  $U = U_0 - U_m$ .



$$i_0 = a_0$$

$$i_{\max} = i_0 + a_1 U_m + a_2 U_m^2$$

$$i_{\min} = i_0 - a_1 U_m + a_2 U_m^2$$

$$\rightarrow a_1 = \frac{i_{\max} - i_{\min}}{2U_m}; \quad a_2 = \frac{i_{\max} + i_{\min} - 2i_0}{2U_m^2}$$

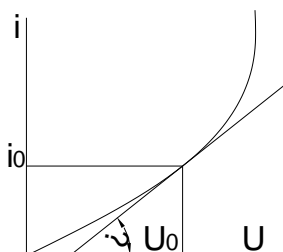
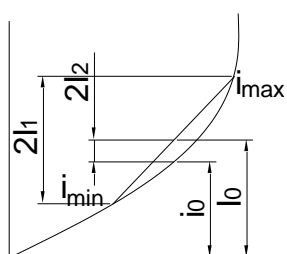
Подставим полученные значения в исходное уравнение.

$$i = i_0 + \frac{i_{\max} - i_{\min}}{2} \cos \omega t + \frac{1}{2} \frac{i_{\max} + i_{\min} - 2i_0}{2} + \frac{1}{2} \frac{i_{\max} + i_{\min} - 2i_0}{2} \cos 2\omega t$$

$$I_0 = i_0 + \frac{1}{2} \frac{i_{\max} + i_{\min} - 2i_0}{2}; \quad I_1 = \frac{i_{\max} - i_{\min}}{2} \text{ - амплитуда 1-ой}$$

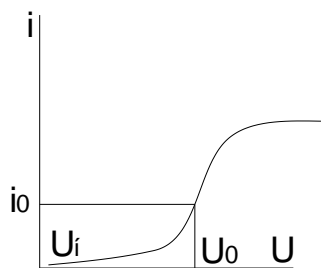
$$\text{гармоники, } I_2 = \frac{1}{2} \frac{i_{\max} + i_{\min} - 2i_0}{2} \text{ - 2-ая гармоника.}$$

Получили спектр.  $i_0$  – ток покоя (первый график).



$\text{tg}\alpha = S_0$  – крутизна в рабочей точке.  $di/du|_{U_0} = a_1 = S_0$  – физически.  $a_0 = i_0$  – ток покоя.  $i = a_0 + a_1(U - U_0) + a_2(U - U_0)^2$  в это формуле  $a_1 = S$  крутизна в рабочей точке,  $a_0 = i_0$  – ток покоя.

Полиномом второй степени можно аппроксимировать только плавно нарастающие или спадающие характеристики.



Если есть перегиб, то  $i = a_0 + a_1(U - U_0) + a_3(U - U_0)^3$ ,  $a_1 = S$  крутизна в рабочей точке,  $a_0 = i_0$  – ток покоя.  $di/dU|_{U_0} = a_1 + 3a_3(U - U_0)^2 = |_{U=U_H=0}$  – из графика,  $a_3 = S_0/3(U_H - U_0)^2$ .

### КЛЮЧЕВЫЕ УСТРОЙСТВА.

Это устройство, имеющее два устойчивых состояния равновесия и отличающихся друг от друга  $i_{\text{ВЫХ}}$ ,  $U_{\text{ВЫХ}}$ ,  $R_{\text{ВЫХ}}$ . Переход из одного состояния в другое осуществляется подачей сигнала на 1 или несколько входов. В устройстве ключа входят кроме ключа источник питания, усилитель, пассивные элементы. В импульсных устройствах коммуникация осуществляется бесконтактно при помощи диода, транзистора, тиристора и т.д. И ключевой режим работы такого устройства характеризуется различными  $R_{\text{ВЫХ}}$ : если  $R_{\text{ВЫХ}} < R_{\text{ЭКВ}}$  цепи – включено; если  $R_{\text{ВЫХ}} > R_{\text{ЭКВ}}$  цепи – выключено.

### ПРОСТЕЙШИЙ ТРАНЗИСТОРНЫЙ КЛЮЧ.

$U_{\text{ВХ}}(t)$  – знакопеременное.  $U_{\text{ВХ}}(t) > 0$  – выключен,  $U_{\text{ВХ}}(t) < 0$  – включено (транзистор открыт и насыщен).

В точке 1 транзистор закрыт (отсечка), в точке 2 – транзистор открыт и насыщен (насыщение).  $E = I_K R + U_{\text{КЭ}}$  – нагрузочная прямая.  $I_{\text{К0}} \rightarrow 0$ ,  $U_2 \rightarrow 0$ .

### Анализ закрытого состояния ключа.

Если транзистор заперт, то  $U_{\text{БЭ}} \geq 0$ . По закону

Кирхгофа:  $U_{\text{БЭ}} = E_1 - I_{\text{К0}} R_B \geq 0$  отсюда  $R_B \leq E_1 / I_{\text{К0}}$  (при всех температурах)  $t_{\text{max}} \rightarrow I_{\text{К0max}}$ . Условие надежного запираения транзистора:

$R_B \geq \frac{E_1}{I_{\text{К0max}}}$ .  $U_{\text{БЭ}} = E_1 - I_{\text{К0}} R_B \approx E_1$ ;  $U_{\text{КЭ}} = E + I_{\text{К0}} R_K \approx -E$ ;  $i_B \approx \frac{E_1}{R_B}$ ;  $i_K \approx \frac{E}{R_K}$ ; В закрытом состоянии на нагрузке 0.

### Анализ режима насыщенного состояния транзистора.

Условие насыщения:  $I_K \leq \beta \cdot I_B$ , на входе  $-E_1$ , чтобы транзистор был открыт.  $I_B \approx \frac{E_1}{R_B}$ ;  $I_K \approx \frac{E}{R_K}$ ; подставляем в первое выражение.  $\frac{E}{R_K} \leq \beta \frac{E_1}{R_B} \Rightarrow$  для

любого коэффициента усиления  $\beta$ .  $R_B = \beta_{\text{min}} \frac{E_1}{E} R_K$ ; Степень насыщения транзистора:  $S = \frac{I_A}{I_{\text{АНАОНУ}}}$ .

$I_{\text{КННА}} = \beta I_{\text{БНАС}}$ , если  $S=1$  то  $I_B = I_{\text{БНАС}}$ ; если  $S > 1$ , то  $I_B > I_{\text{БНАС}}$ ,  $S < 1$  – активный режим. Условие

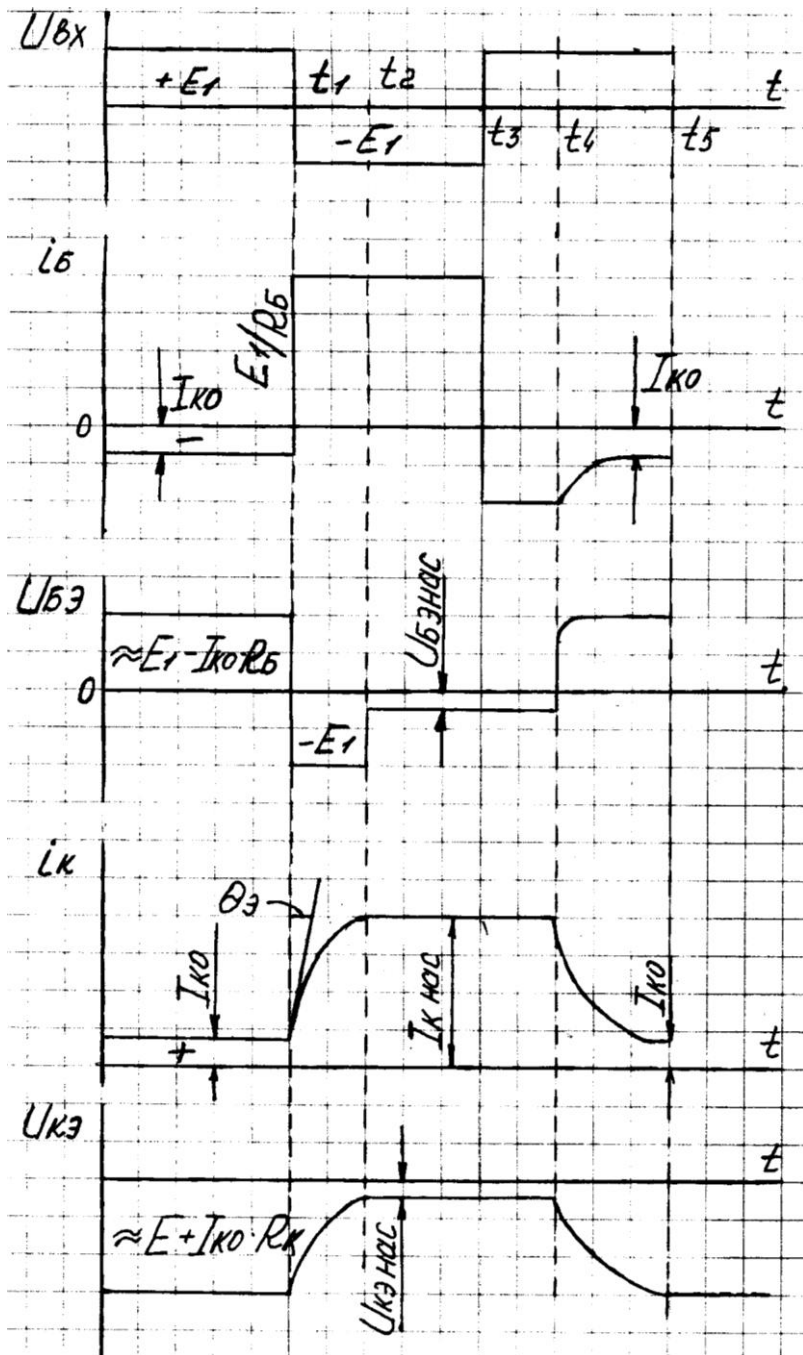
насыщения транзистора:  $R_B = \frac{\beta}{S} \cdot \frac{E_1}{E} R_K$ . В режиме насыщения:  $I_B = \frac{E_1 - U_{\text{БЭНАС}}}{R_B} \approx \frac{E_1}{R_B}$ ;

$I_K = \frac{E_K - U_{\text{КЭНА}}}{R_K} \approx \frac{E_K}{R_K}$ ;  $U_{\text{БЭ}} = U_{\text{БЭНАС}}$ ;  $U_{\text{КЭ}} = U_{\text{КЭНАС}}$ .  $U_m = E - I_{\text{К0}} R_K - U_{\text{КЭНАС}} \cong E$ ; амплитуда:

$I_m = \frac{E - U_{\text{КЭНАС}}}{R_K} - I_{\text{К0}} \approx \frac{E}{R_K}$ .

### ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В КЛЮЧЕВОМ УСТРОЙСТВЕ.

Транзистор – инерционное устройство, поэтому переход из включенного состояния в выключенное не может происходить мгновенно. На входе действует меандер ( $\pm E$ ),  $E_1$  на базу транзистора ррп-типа, транзистор заперт, маленький ток коллектора. При переходе на ток  $i_B$  резко растет (2), этот ток открывает транзистор. В момент  $t_3$  обратный перепад, ток базы  $i_B$  сразу реагирует.



[0 t<sub>1</sub>] транзистор заперт.  $i_B = -I_{K0}$ ;  $i_K = +I_{K0}$ ;  $U_{БЭ} = E_1 - I_{K0}R_B$ ;  $U_{КЭ} = -E + I_{K0}R_K$ . В момент времени t<sub>1</sub> подается перепад напряжения:  $U_{ВХ} = -E_1$ .  $i_B$  – растет и становится равным  $i_B = -E_1/R_B$ .  $U_{БЭ}$  резко падает, но  $i_K$  возрастает, стремясь к  $\beta i_B$  – уровень кажущегося тока.  $I_B \gg I_{БНАС}$ , поэтому S велико.  $U_{КЭ}$  нарастает, стремясь к  $U_{КЭНАС}$ . В момент времени t<sub>2</sub> транзистор в режиме насыщения, т.е.  $i_K = I_{КНАС}$ . Время  $t = t_2 - t_1$  – является временем включения транзистора (длиной фронта).  $t_{ВКЛ} = -\theta_э \ln(1 - 1/S)$  – время включения.  $\theta_э$  – характеристика инерционных свойств транзистора (параметр).  $\ln(1 - 1/S) \cong -1/S$ , если S велико, то  $t_{ВКЛ} \approx \theta_э/S$ .  $t_{ВКЛ}$  меньше, чем выше S (степень насыщения) и  $\theta_э$  меньше (см  $t_{ВКЛ}$  на графике). С времени t<sub>2</sub> до t<sub>3</sub> транзистор открыт и насыщен и идет накопление неосновных носителей в базе. В момент времени t<sub>3</sub> перепад в обратную сторону,  $i_B$  резко меняется на  $i_B = -E_1/R_B$ . t<sub>3</sub>-t<sub>4</sub> – время рассасывания неосновных носителей в базе. t<sub>4</sub>-t<sub>5</sub> – время задержки выключения транзистора. t<sub>5</sub> – транзистор переходит в активный режим работы и начинает закрываться.  $i_K \downarrow \Rightarrow I_{K0}$ ;  $i_B \downarrow \Rightarrow I_{K0}$ ;  $U_{БЭ} \uparrow = E_1$ ;  $U_{КЭ} \downarrow = -E + I_{K0}R_K$ ; t<sub>5</sub> – достигаются токи I<sub>K0</sub>. От t<sub>4</sub> до t<sub>6</sub> – формируется спад импульса (t<sub>ВЫКЛ</sub> – время спада).  $\theta_K = R_K \cdot C_K$  – постоянная времени заряда емкости коллекторного перехода. C<sub>K</sub> – емкость коллекторного перехода. t<sub>ВЫКЛ</sub> = 3 · θ<sub>K</sub>. транзистор заперт. **Выводы:** 1) U<sub>ВЫХ</sub> –

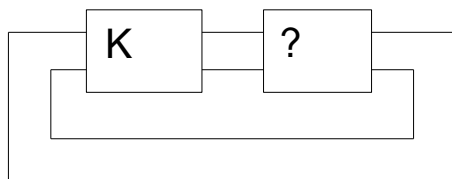
напряжение однополярное, U<sub>ВХ</sub> – двуполярное. 2) моменты переключения U<sub>ВХ</sub> и U<sub>ВЫХ</sub> не совпадают. 3) U<sub>ВХ</sub> не ни фронта, ни спада; U<sub>ВЫХ</sub> характеризуется фронтом и спадом. 4) U<sub>ВХ</sub> и U<sub>ВЫХ</sub> находятся в противофазе.

### ГЕНЕРИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ.

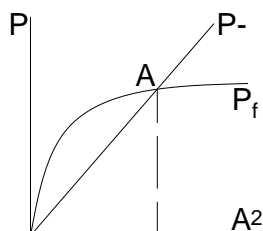
Все генераторы делят на: генераторы с самовозбуждением – автогенераторы, генераторы с внешним возбуждением – резонансные усилители, работающие в режиме больших амплитуд с отсечкой тока.

### АВТОГЕНЕРАТОРЫ –

Это устройства, в которых самопроизвольно возникают колебания. **Общая схема:**



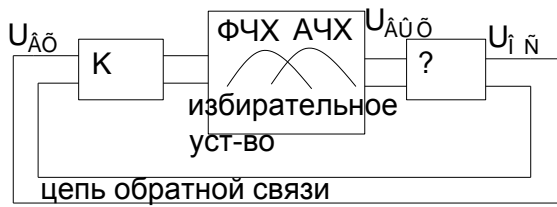
$\dot{K}$  – комплексный коэффициент усиления,  $\dot{\beta}$  комплексный коэффициент обратной связи, получаем цепь с положительной обратной связью.



P – мощность передаваемая системы вход-выход по обратной связи, P<sub>f</sub> – мощность, сообщаемая системе (нелинейный вид графика говорит о нелинейном характере усиления). Точка А на графике – это амплитуда установившихся колебаний (амплитуда с выхода на вход одна и та же) Параметры колебаний определяются из ДУ, описывающего физическую суть процесса, или из условия баланса фаз или амплитуд.

## ГЕНЕРИРОВАНИЕ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ.

Необходимо в систему внести избирательное устройство, которое будет создавать условие, при котором колебания с выхода на вход будут подаваться в фазе только одной частоте (частоте генерирования), тогда **Общая схема:**



Разорвем обратную связь и составим уравнения:

$$\frac{\dot{U}_{OC} \cdot \dot{U}_{ВЫХ}}{\dot{U}_{ВХ} \cdot \dot{U}_{ВЫХ}} = \dot{k} \cdot \dot{\beta} = k e^{j\varphi_k} \cdot \beta e^{j\varphi_\beta} = k\beta e^{j(\varphi_k + \varphi_\beta)}; \quad \varphi_k + \varphi_\beta = 0, \quad 2\pi, \dots$$

2πп – **условие баланса фаз.** Kβ>1 – условие нарастания колебаний, когда колебания с выхода на вход идет в фазе

и амплитуда постоянна: Kβ=1 – условие баланса амплитуд в установившемся режиме.

### ГЕНЕРАТОР С ИНДУКТИВНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ.

Рассмотрим схему по переменной составляющей, т.е. источник питания и источник смещения замкнуты на блокировочные емкости.

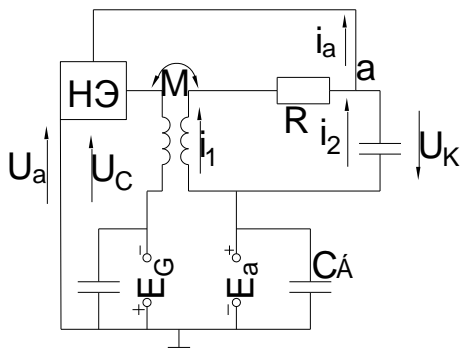
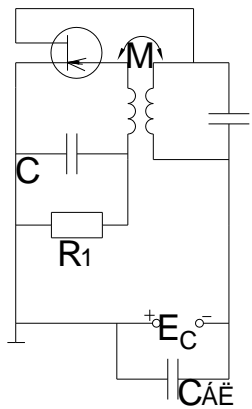
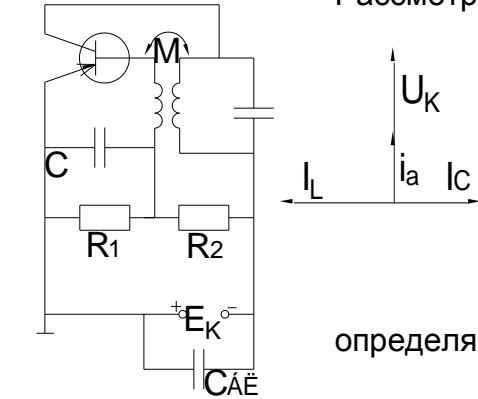
U<sub>a</sub> – напряжение на нелинейном элементе, U<sub>к</sub> – напряжение контура. Из законов Кирхгофа: i<sub>a</sub>=i<sub>1</sub>+i<sub>2</sub>; U<sub>к</sub>+U<sub>a</sub>=0 → U<sub>a</sub>=-U<sub>к</sub>;

$$L \frac{di_1}{dt} + i_1 r = \frac{1}{C} \int i_2 dt \rightarrow LC \frac{d^2 i_1}{dt^2} + rC \frac{di_1}{dt} = i_2;$$

поставляем в выражение для токов: i<sub>a</sub> = i<sub>1</sub> + LC \frac{d^2 i\_1}{dt^2} + rC \frac{di\_1}{dt}.

Ток через активный элемент определяется: i<sub>a</sub> = S · U<sub>c</sub> + \frac{1}{R\_i} U<sub>a</sub>, где R<sub>i</sub> – внутреннее сопротивление

нелинейного элемента, S – крутизна нелинейного элемента. U<sub>c</sub> = ±M \frac{di\_1}{dt} – ЭДС



взаимоиндукции, U<sub>a</sub> = -U<sub>к</sub> = -L \frac{di\_1}{dt} - r i\_1 подставляем в выражение для тока i<sub>a</sub>.

$$i_a = \pm S \cdot M \frac{di_1}{dt} - \frac{L}{R_i} \frac{di_1}{dt} - \frac{r}{R_i} i_1.$$

Приравниваем два выражения для тока i<sub>2</sub>:

$$i_1 + LC \frac{d^2 i_1}{dt^2} + rC \frac{di_1}{dt} = \pm S \cdot M \frac{di_1}{dt} - \frac{L}{R_i} \frac{di_1}{dt} - \frac{r}{R_i} i_1 \rightarrow$$

$$LC \frac{d^2 i_1}{dt^2} + (rC + \frac{L}{R_i} \mp S \cdot M) \frac{di_1}{dt} + (1 + \frac{r}{R_i}) i_1 = 0. \quad \text{Делим на LC:}$$

$$\frac{d^2 i_1}{dt^2} + (\frac{r}{L} + \frac{L}{R_i C} \mp \frac{S \cdot M}{LC}) \frac{di_1}{dt} + (1/LC + \frac{r}{LC \cdot R_i}) i_1 = 0. \quad \text{Введем обозначения}$$

для этого уравнения: \frac{d^2 i\_1}{dt^2} + 2 \cdot \alpha \frac{di\_1}{dt} + \omega\_0^2 i\_1 = 0, \quad \omega\_0 = 1/\sqrt{LC}.

Решение в виде i<sub>1</sub>(t) = A<sub>0</sub> e<sup>-αt</sup> cos(ω<sub>1</sub>t + φ<sub>0</sub>), где ω<sub>1</sub> = \sqrt{\omega\_0^2 - \alpha^2}. A<sub>0</sub> и φ<sub>0</sub> – амплитуда и фаза.

Найдем α – коэффициент затухания: α = \frac{1}{2L} (r + \frac{L}{R\_i} \mp \frac{S \cdot M}{C}). Рассмотрим случаи, когда: 1) M=0,

α>0 – колебаний в автогенераторе нет, условие затухания; 2) \dot{I} \neq 0, положительная связь,

r + \frac{L}{R\_i \cdot C} < \frac{S \cdot M}{C} \Rightarrow α < 0 – колебания нарастают. В начальный момент времени S=S<sub>0</sub> – крутизна в

рабочей точке; S<sub>0</sub> > \frac{rC}{M} + \frac{L}{R\_i \cdot M} – уравнение возбуждения колебаний в автогенераторе: 1) чем больше

S<sub>0</sub> и R<sub>i</sub> (усиление), тем проще возбудить колебания; 2) чем больше потери r, тем сложнее возбудить колебания.

## УСТАНОВИВШИЙСЯ РЕЖИМ ГЕНЕРАТОРА. ОСНОВА КВАЗИЛИНЕЙНОГО МЕТОДА.

$\frac{d^2i}{dt} + (\frac{r}{L} - \frac{S \cdot M}{LC}) \frac{di}{dt} + \frac{1}{LC}i = 0$ , S – крутизна, с увеличением амплитуды колебаний меняется, S – зависит от рабочей точки, поэтому ДУ нелинейно.

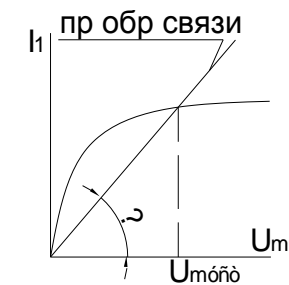
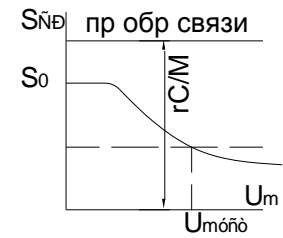
**Установившийся режим** – это режим работы автогенератора при постоянной амплитуде колебаний. За счет нелинейного ВАХ нелинейного элемента на его выходе появляются высшие гармоники основной частоты, т.к. после стоит колебательный контур.  $Q \gg 1$  – добротность колебательного контура. R на резонансной частоте велико, а на всех остальных частотах мало, поэтому высшими гармониками на выходе можно пренебречь, т.е. система ведет себя как бы линейно, т.е. на выходе гармонические колебания.

Основа квазилинейного метода: в установившемся режиме автогенератора его можно считать линейной системой. Тогда крутизна  $S = S_{CP}$  – средняя крутизна, которая определяется амплитудой токов и напряжений:  $S = S_{CP} = \frac{I_1}{U_m}$ , где  $I_1$  – амплитуда первой гармоники выходного тока,  $U_m$  – амплитуда колебаний в установившемся режиме. Тогда заменяем S в уравнении на  $S_{CP}$ , поэтому

затухания практически равно нулю.  $\alpha = \frac{1}{2}(\frac{r}{L} - \frac{S_{CP} \cdot M}{LC}) = 0 \Rightarrow S_{CP} = \frac{r \cdot C}{M}$  – условие установившихся

колебаний. Условие возбуждения колебаний:  $S_0 > \frac{r \cdot C}{M}$ .

### АМПЛИТУДА УСТАНОВИВШИХСЯ КОЛЕБАНИЙ.



Построим зависимость  $S_{CP}$  от амплитуды колебаний, возникающих в контуре. Если увеличивать M (сводить катушки индуктивности), то прямая будет опускаться и когда пресечет график  $S_0$ , то даст амплитуду установившихся колебаний  $U_{муст}$ .

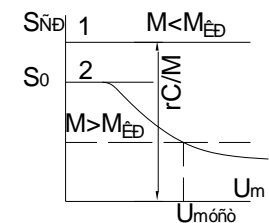
**Колебательная характеристика** – это зависимость амплитуды первой гармоники выходного тока от амплитуды колебаний, возникающих в автогенераторе:  $I_1 = f(U_m)$ .

$$S_{CP} = \frac{r \cdot C}{M}, \quad I_1 = S_{CP} \cdot U_m \Rightarrow I_1 = \frac{r \cdot C}{M} \cdot U_m, \quad \alpha = \arctg \frac{1}{X_{СВЯЗ}}; X_{СВЯЗ} = \frac{M}{r \cdot C}$$

сопротивление обратной связи.

### РЕЖИМЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ АВТОГЕНЕРАТОРА.

1. **МЯГКИЙ РЕЖИМ ВОЗБУЖДЕНИЯ** - Это режим, при котором автогенератор возбуждается самопроизвольно. Характеристическая зависимость  $S_{CP} = f(U_m)$  определяется величиной напряжения смещения на входе нелинейного элемента.  $S_{CP} = \frac{r \cdot C}{M}$ .



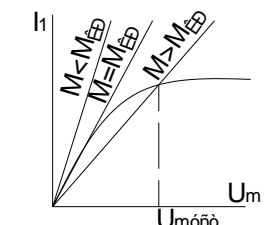
Если M мало, то прямая обратной связи высоко:  $M \ll M_{кр}$ , колебаний нет.

Увеличиваем M,  $M = M_{кр}$ , но условие возбуждения не выполнено  $S_0 = \frac{r \cdot C}{M_{кр}}$ ,

колебаний нет, увеличиваем M дальше  $M > M_{кр}$ .  $S_0 > \frac{r \cdot C}{M_{кр}}$ , возникают

колебания,  $U_m \neq 0$ . Дальнейшее увеличение M приводит к нарастанию амплитуды установившихся колебаний. Если M уменьшать, то  $U_{муст}$  уменьшаются, когда  $M = M_{кр}$  колебания не срываются:

$S_{кр} = S_0 = \frac{r \cdot C}{M_{кр}} \Rightarrow U_m \neq 0$ . Когда  $M < M_{кр}$   $S_0 < \frac{r \cdot C}{M_{кр}}$  колебания сорвутся и  $U_m = 0$ .

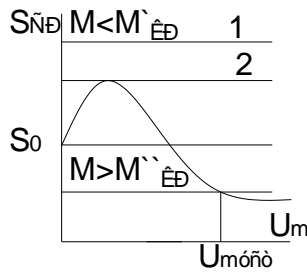
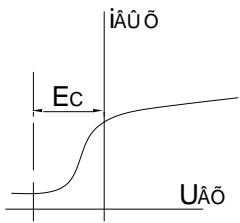


При одно и том же коэффициенте магнитной связи  $M_{кр}$  происходит возникновение и срывание колебаний. **Рассмотрим это в колебательной характеристике.**

$M > M_{кр}$  – возникновение колебаний. До тех пор пока мы можем сводить катушки индуктивности. **Характеристика возбуждения** – это зависимость амплитуды установившихся колебаний от коэффициента взаимной индукции M  $U_{муст} = f(M)$  для мягкого режима работы.

мягкого режима работы.

2. **ЖЕСТКИЙ РЕЖИМ ВОЗБУЖДЕНИЯ АВТОГЕНЕРАТОРА** – это режим, при котором при возбуждении колебания необходимо подать дополнительное колебание с амплитудой больше критического значения или увеличить обратную связь.



При жестком режиме зависимость  $S_{CP} = f(U_m)$ .

1)  $M < M_{KP}$   $U_m = 0$ , колебаний нет, увеличиваем  $M$ .

2)  $M = M'_{KP}$   $S_{CP} < \frac{r \cdot C}{M'_{KP}}$ ;  $U_m = 0$ , не выполнено условие

самовозбуждения  $S_0 < S_{KP}$ . 3)  $M = M''_{KP}$

$S_{CP} = S_0 = \frac{r \cdot C}{M''_{KP}} \Rightarrow U_m = 0$ , не выполнено условие

возбуждения. 4)  $M > M''_{KP}$   $S_0 > S_{CP} = \frac{r \cdot C}{M''_{KP}} \Rightarrow U_m \neq 0$ , возникают колебания. С ростом  $M$  амплитуда

колебаний  $U_m$  растет. Уменьшаем  $M$ ,  $U_m$  уменьшается, когда  $M = M''_{KP}$ , то условие

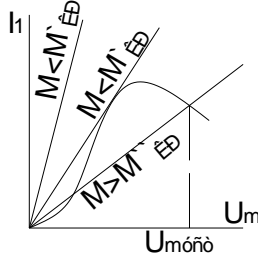
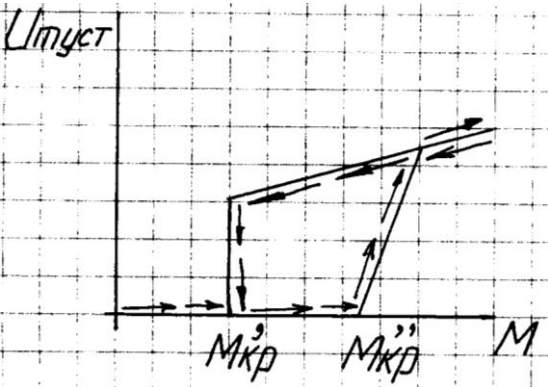
$S_{CP} = S_0 = \frac{r \cdot C}{M''_{KP}} \Rightarrow U_m \neq 0$ .  $M < M'_{KP}$  и равно  $M = M'_{KP}$   $S_{CP} = S_0 = \frac{r \cdot C}{M''_{KP}} \Rightarrow U_m = 0$ . Уменьшаем  $M$  дальше до

$M < M'_{KP}$   $U_m = 0$  – срывание колебаний.

В жестком режиме возбуждения возникновение и срыв колебаний происходит при разных значениях  $M_{KP}$ .

**ВЫВОДЫ:** 1) недостаток жесткого режима возбуждения является необходимость либо: подавать возбуждающий сигнал, увеличение обратной связи, изменение напряжения  $E_c$ . 2) при жестко режим возбуждения амплитуды могут быть

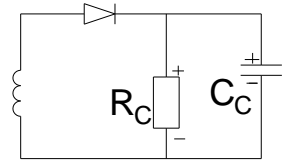
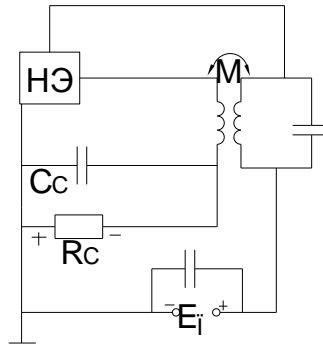
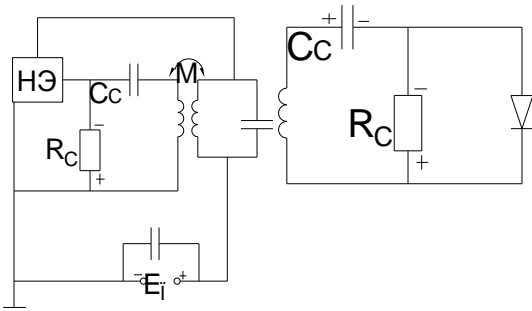
больше, чем в мягком, т.е. выше помехоустойчивость. 3) обычно идет работа в режиме отсечки выходного тока, выше



КПД.

### ЦЕПЬ АВТОСМЕЩЕНИЯ

Позволяет соединять все плюсы мягкого и жесткого режима возбуждения автогенератора.



В начальный момент при включении питания находимся в мягком режиме возбуждения. По мере нарастания колебаний напряжение смещения растет и переходим в жесткий режим работы автогенератора.

### РАСЧЕТ ЦЕПИ АВТОСМЕЩЕНИЯ.

Необходимо знать  $i_{C_{MAX}}$  – максимальный входной ток,  $U_{mуст}$  – амплитуду в установившемся режиме,  $U_{C0}$  – напряжение смещения в установившемся режиме.



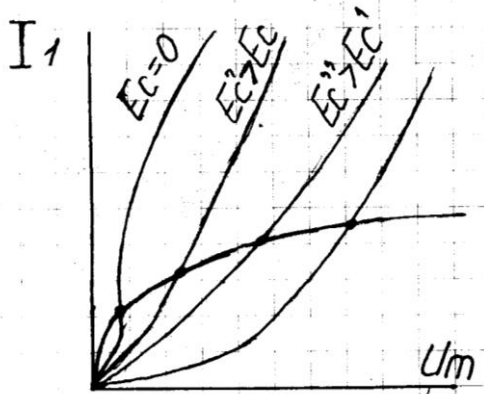
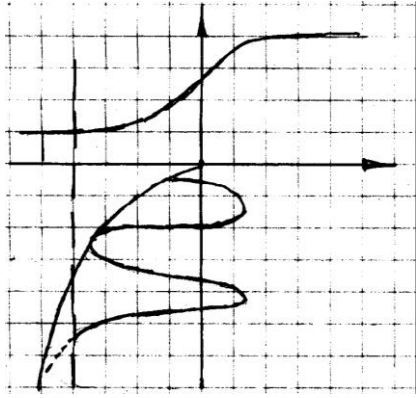
$R_C = \frac{U_{C0}}{I_0}$ ,  $I_0$  – постоянная составляющая входного тока.

$I_0 = i_{C_{MAX}} \cdot \alpha_0$  – табличный коэффициент.  $\cos \vartheta = -\frac{U_{C0}}{U_m}$  – угол отсечки.

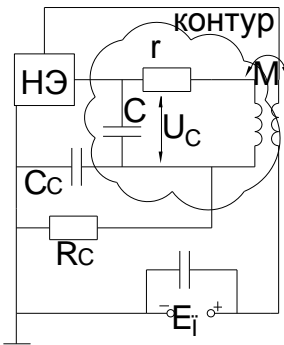
Задаем условие, чтобы снималось плавно нарастающее напряжение смещения: постоянная времени -  $R_C \cdot C_C \gg T = \frac{2\pi}{\omega}$  –

период колебаний. Если  $R_C \cdot C_C$  очень велико, то появляется явление прерывистой генерации, нарастание амплитуды колебания может превысить скорость установления смещения на входе, т.е. напряжение смещения становится запирающим для нелинейного элемента и колебания срываются.

Затем емкость разрезается через сопротивление, возвращающее напряжение смещения к нулю, колебания возникают вновь и все повторяется.



### АВТОГЕНЕРАТОР С КОНТУРОМ ВО ВХОДНОЙ ЦЕПИ С ИНДУКТИВНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ.

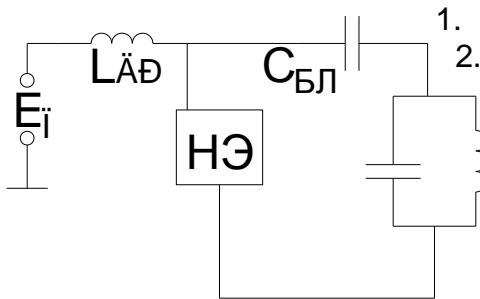


Уравнение контура:  $\frac{1}{C} \int idt + r \cdot i + L \frac{di}{dt} = M \frac{di_2}{dt} = \frac{M \cdot S}{C} i$ ; для нелинейного

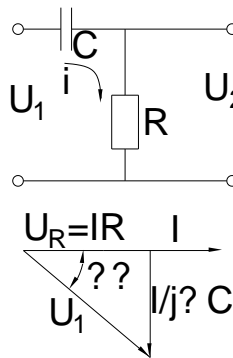
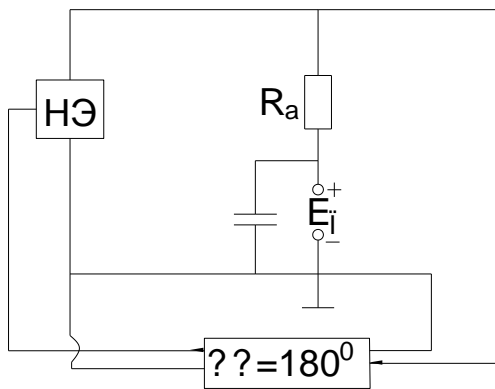
элемента:  $i_2 = S \cdot U_c \leftarrow U_c = \frac{1}{C} \int idt$ . Продифференцируем уравнение и получим:

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + \left( \frac{r}{L} - \frac{M \cdot S}{LC} \right) \frac{di}{dt} + \frac{1}{LC} = 0.$$

### АВТОГЕНЕРАТОР С ИНДУКТИВНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ПОДАЧЕЙ ПИТАНИЯ.



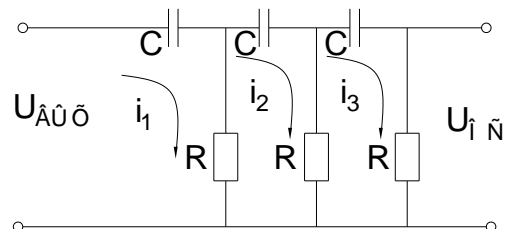
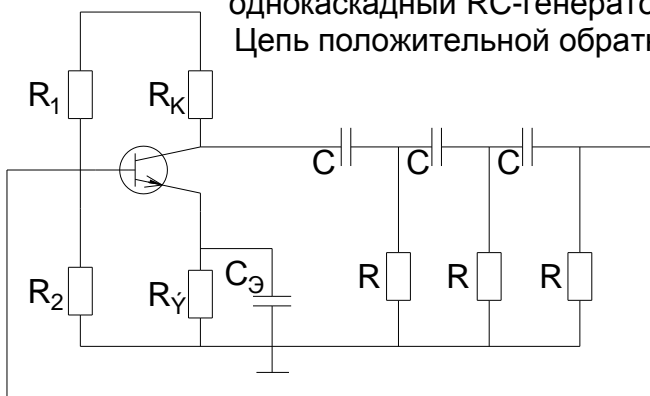
1. постоянная составляющая не подается в контур, т.к. есть  $C_{бл}$ .
2. нагрузка нелинейного элемента по постоянной составляющей является активное сопротивление дросселя  $R_{АДР}$ .
3. переменная составляющая не подается в источник питания, т.к.  $\omega L_{ДР} = \infty$ .
4. нагрузкой нелинейного элемента по переменной составляющей является  $R_{ЭКВ}$  контура.



**RC - ГЕНЕРАТОРЫ.**  
 LC – генератор (выше) нельзя использовать на низких частотах, т.к. LC большие, т.е. большие габаритные размеры, а это приводит к тому, что контур плохо перестраивается по частоте и низко добротен. **Блок-схема:**  
 Посмотрим, на сколько сможет сдвинуть фазу этот 4-полюсник:  $\Delta\phi$  – сдвиг фаз  $U_1$  относительно  $U_2$ , максимальный сдвиг меньше  $90^\circ$ .

Для поворота фазы на  $180^\circ$  необходим минимум RC-цепочки. Для этого рассмотрим

однокаскадный RC-генератор.  
 Цепь положительной обратной связи:



Запишем уравнения по методу контурных токов:  $\dot{U}_{ВЫХ} = i_1(\frac{1}{j\omega C} + R) - i_2 R$ ;  $0 = -i_1 R + i_2(\frac{1}{j\omega C} + 2R) - i_3 R$ ;

$0 = -i_2 R + i_3(\frac{1}{j\omega C} + 2R)$ ;  $\dot{U}_{OC} = i_3 R$ . Из второго и третьего уравнения выражаем неизвестные токи  $i_2, i_1$

через ток  $i_3$  и ставим в первое уравнение.  $i_2 = i_3(\frac{1}{j\omega CR} + 2)$ ;  $i_1 = i_3\left[\left(\frac{1}{j\omega CR} + 2\right)^2 - 1\right]$ . Находим

$\dot{U}_{ВЫХ} = i_3\left\{\left[\left(\frac{1}{j\omega CR} + 2\right)^2 - 1\right] \cdot \left(\frac{1}{j\omega CR} + 1\right) - \left(\frac{1}{j\omega CR} + 2\right)\right\} \cdot R$ . Найдем коэффициент обратной связи

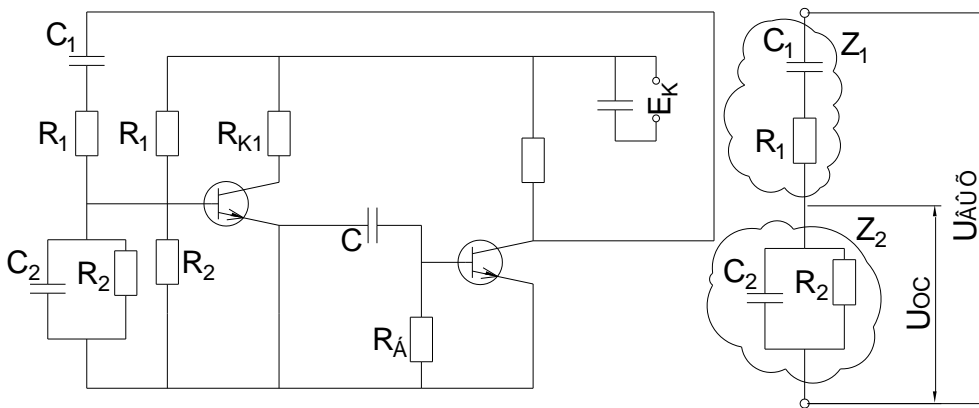
$\beta(j\omega) = \frac{\dot{U}_{OC}}{\dot{U}_{ВЫХ}} = \frac{1}{\frac{1}{(j\omega CR)^3} + \frac{5}{(j\omega CR)^2} + \frac{6}{j\omega CR} + 1}$ . Найдем мнимую часть и приравняем ее нулю –

условие баланса фаз (резонанс):  $\text{Im}\beta(j\omega) = 0$ ,  $\frac{-1}{j\omega^3 C^3 R^3} + \frac{6}{j\omega CR} = 0 \Rightarrow \omega_{ГЕН} = \frac{1}{RC\sqrt{6}}$ , частота

генерации, где выполнено условие баланса фаз.  $\beta(\omega_{ГЕН}) = \frac{1}{1 - \frac{5}{\omega_{ГЕН}^2 C^2 R^2}} = -\frac{1}{29}$ , коэффициент

обратной связи на частоте генерации.  $K\beta > 1 \Rightarrow |K| > 29$  - условие возбуждения генератора.

### ДВУКАСКАДНЫЙ RC-ГЕНЕРАТОР С МОСТОМ ВИНА В ЦЕПИ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ.



Мост Вина:

$$Z_1 = \frac{1}{j\omega C_1} + R_1 = \frac{1 + j\omega C_1 R_1}{j\omega C_1};$$

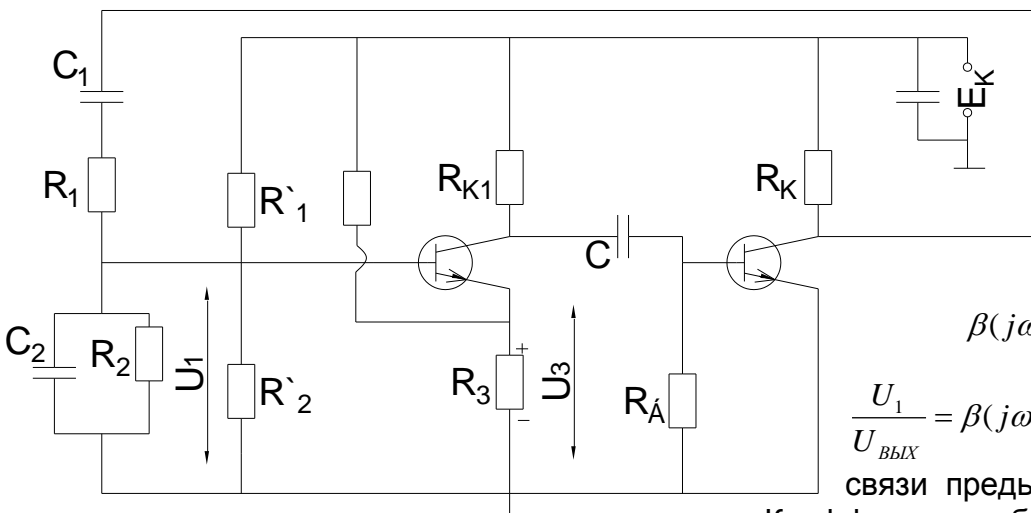
$$Z_2 = \frac{1/j\omega C_2 \cdot R_2}{1 + j\omega C_2 R_2} = \frac{R_2}{1 + j\omega C_2 R_2}.$$

Имеем два каскада, возможен поворот на  $360^\circ$ , цепь обратной связи должна повернуть сигнал 0 или  $360^\circ$ , чтобы был выполнен баланс фаз.  $\beta(j\omega) = \frac{\dot{U}_{OC}}{\dot{U}_{ВЫХ}} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{1}{R_1/R_2 + 1/j\omega C_1 \cdot R_2 + C_2/C_1 + 1}$ ;

$\text{Im}\beta(j\omega) = 0$ ;  $\frac{1}{j\omega C_1} \cdot R_2 + j\omega C_2 R_1 = 0 \Rightarrow \omega_{ГЕН} = \frac{1}{\sqrt{R_1 C_1 R_2 C_2}}$ ;  $\beta(\omega_{ГЕН}) = \frac{1}{3}$ , при условии, что  $R_1 = R_2 = R$  и

$C_1 = C_2 = C$ . Условие возбуждения автогенератора:  $K\beta > 1 \Rightarrow |K| > 3$ .

### ПОВЫШЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ЧАСТОТЫ ГЕНЕРАЦИИ В RC-ГЕНЕРАТОРЕ С МОСТОМ ВИНА.



Для повышения стабильности частоты необходимо вести дополнительную обратную связь.

$$\beta(j\omega) = \frac{\dot{U}_{OC}}{\dot{U}_{ВЫХ}} = \frac{U_1 - U_3}{U_{ВЫХ}} = \frac{U_1}{U_{ВЫХ}} - \frac{R_3}{R + R_3};$$

$$\frac{U_1}{U_{ВЫХ}} = \beta(j\omega) = \frac{1}{3} \text{ - коэффициент обратной}$$

связи предыдущего случая, т.к. ток тот же.

Коэффициент обратной связи можно уменьшить



из-за наличия  $\frac{R_3}{R+R_3} \Rightarrow K$  увеличивается, т.к.  $K=1/\beta$ , чем выше коэффициент, тем стабильнее частота.

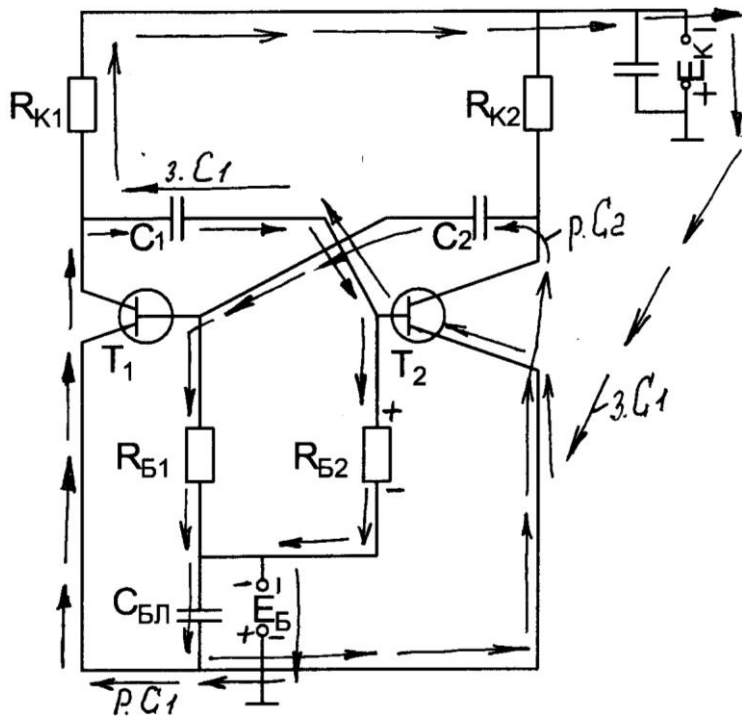
### ГЕНРИРОВАНИЕ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ.

Синусоидальные колебания бесконечно дифференцируемы во времени. Несинусоидальные колебания характеризуются разрывом во времени функции или одной из ее производных, такие колебания называют разрывными или релаксационными, а сами генераторы релаксационными генераторами. К таким генераторам относятся: мультивибраторы, блокинг-генераторы, генераторы петлеобразного напряжения, генераторы линейно изменяемого напряжения (ГЛИН).

### МУЛЬТИВИБРАТОРЫ.

Это двухкаскадный RC-усилитель с положительной обратной связью. Одна из связей обязательно должна быть емкостной. Работает в двух режимах: автоколебательном режиме и ждущем режиме. Автоколебательный режим имеет два квазиустойчивых состояния равновесия, ждущий имеет одно состояние квазиустойчивого равновесия. Используются в качестве задающих генераторов прямоугольных импульсов, расширителей импульсов, делителей частоты следования импульсов.

### МУЛЬТИВИБРАТОР С КОЛЛЕКТОРНО-БАЗОВЫМИ СВЯЗЯМИ В АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОМ РЕЖИМЕ.



1. считают, что транзистор открывается при  $U_{БЭ}=0$
2. если транзистор открыт, то он насыщен и  $U_{Б}=0, U_{КЭ}=0$  (пренебрегают).
3. если транзистор закрыт, то  $I_{КЭ}=0$ , обратный ток коллектора. Начиная рассматривать с момента  $T_1$ -открыт,  $T_2$ -закрыт,  $C_2$  заряжена до напряжения  $(-E_{К})$ , а емкость  $C_1$  перезаряжается через открытый транзистор  $T_1$ .
4. пренебрегают инерционными свойствами транзистора (открывается/закрывается мгновенно)

Этапы работы схемы:

1. Разряд емкости  $C_1$  по цепочке:

$+C_1 \rightarrow R_{Б2} \rightarrow E_{Б} \rightarrow T_1(\text{э-к}) \rightarrow -C_1$ ;

$\tau_{PC1} = C_1(R_{Б2} + r \cdot T_{1\text{откр}}) \cong C_1 \cdot R_{Б2}$  - постоянная времени.

2. Заряжается емкость  $C_1$  по цепочке:

$+E_{К} \rightarrow T_{2\text{откр}}(\text{э-б}) \rightarrow C_1 \rightarrow R_{К1} \rightarrow -E_{К}$ .

$\tau_{3C1} = C_1(R_{К1} + r \cdot T_{2\text{откр}}) \cong C_1 \cdot R_{К1}$  - постоянная времени.

3. разрядка емкости  $C_2$ :  $+C_2 \rightarrow R_{Б1} \rightarrow E_{Б} \rightarrow T_{2\text{откр}}(\text{э-к}) \rightarrow -C_2$ ;  $\tau_{PC2} \cong C_2 \cdot R_{Б1}$ .

4. заряд емкости  $C_2$ :  $+E_{К} \rightarrow T_{1\text{откр}}(\text{э-б}) \rightarrow C_2 \rightarrow R_{К2} \rightarrow -E_{К}$ ;  $\tau_{3C2} \cong C_2 \cdot R_{К2}$ .

### Временные диаграммы работы мультивибратора.

С момента  $[0 \ t_1]$   $T_1$  - открыт и насыщен,  $U_{К1}=0, U_{Б1}=0$ ;  $T_2$  - закрыт,  $U_{К2}=E_{К}, U_{Б2} \downarrow \rightarrow$  стремясь к  $-E_{Б}$ , т.к. идет разрядка емкости  $C_1$ .

В момент времени  $t_1$  достигается  $U_{Б2}=U_{Б \text{ отпирания}}=0$ ,  $T_2$  начинает открываться.  $i_{К2} \uparrow, |U_{К2}| \downarrow$ , а по знаку  $U_{К2} \uparrow$ .  $U_{Б1} \uparrow$  и  $T_1$  начинает закрываться  $\rightarrow i_{К1} \downarrow, |U_{К1}| \uparrow$ , а по знаку  $U_{К1} \downarrow \rightarrow -E_{К}$ .  $U_{Б2} \downarrow$  пошел лавинообразный процесс:  $T_1$  - закрывается,  $T_2$  - открывается.  $[t_1-t_2]$ : заряд емкости  $C_1$ , что приводит к формированию фронта импульса. И дальше процесс повторяется. (Если например увеличить емкость  $C_2$ , то дольше разрядка).  $\tau_{PC2} \gg \tau_{3C2}$ , чтобы были прямоугольные импульсы.

## ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ВЫХОДНОГО ИМПУЛЬСА.

Для упрощения считают, что  $E_B = E_K$ . Необходимо подсчитать длительность импульса  $\tau_{ИМП} = t_2 - t_1$ . Расчет начинаем делая начиная описывать разрядку  $C_2$ :  $U_{B1}(t-t_1) = 2E_K \exp(-\frac{(t-t_1)}{\tau_{PC2}}) - E_K$ ,

где  $t$  – текущее значение времени,  $t_1$  – емкость начинает разряжаться. При этом  $U_{B1}$  в точке  $t_2$  равно нулю.

$$U_{B1}(t_2 - t_1) = 2E_K \exp(-\frac{(t_2 - t_1)}{\tau_{PC2}}) - E_K = 0 \rightarrow$$

определяем  $t_2 - t_1$ :

$$\tau_{ИМП} = t_2 - t_1 = \tau_{PC2} \cdot \ln 2 \approx 0.69 \cdot C_2 \cdot R_{B1} \text{ с первого}$$

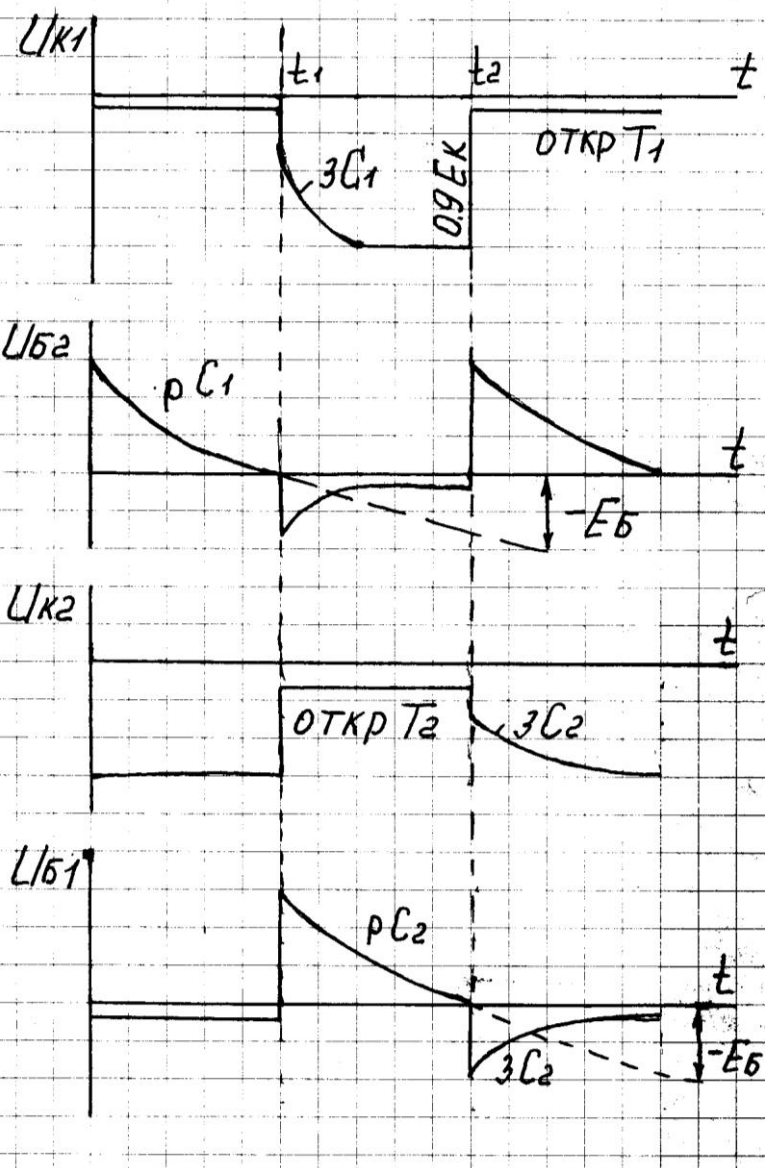
транзистора. Аналогично  $\tau_{ИМП2}$  снимаем со второго  $T_2$ .  $\tau_{ИМП2} = 0.69 \cdot C_1 \cdot R_{B2}$ .

$T = \tau_{ИМП1} + \tau_{ИМП2} = 0.69(R_{B1} \cdot C_2 + R_{B2} \cdot C_1)$  - период повторения. **Фронт импульса** – это то время, в течение которого устанавливается напряжение  $0.9U_K$  – максимальное значение.

$$U_{K1}(t-t_1) = -E_K (1 - \exp(-\frac{t-t_1}{\tau_{3C1}})); \tau_{\phi1} = t' - t_1;$$

$$U_{K1}(t' - t_1) = -0.9E_K = -E_K (1 - \exp(-\frac{\tau_{\phi1}}{\tau_{3C1}})) \Rightarrow \ln 1/0.1 = \tau_{\phi1} / \tau_{3C1}$$

$$\tau_{\phi1} = 2.3 \cdot \tau_{3C1} = 2.3 \cdot C_1 \cdot R_{K1}; \tau_{\phi2} = 2.3 \cdot C_2 \cdot R_{K2}.$$



## МУЛЬТИВИБРАТОР С КОЛЛЕКТОРНО-БАЗОВЫМИ СЯЗЯМИ В ЖДУЩЕМ РЕЖИМЕ.

Изначально мультивибратор в устойчивом состоянии равновесия  $T_2$  – открыт (- на базе),  $T_1$  – закрыт. **Разряд  $C_1$** :  $+C_1 \rightarrow R_{B2} \rightarrow E_K \rightarrow T_1 \rightarrow -C_1$ ,  $\tau_{PC1} = C_1 R_{B2}$ , разряд емкости  $C_1$  определяет время закрытого состояния  $T_2$ , а  $C_2$  – время закрытого состояния  $T_1$ . **Заряд  $C_1$** :  $+E_K \rightarrow T_{2ЭБ} \rightarrow C_1 \rightarrow R_{K1} \rightarrow -E_K$ ;  $\tau_{3C1} = C_1 R_{K1}$ . **Разряд  $C_2$** :  $+C_2 \rightarrow R_{B1} \rightarrow E_B \rightarrow T_2 \rightarrow -C_2$ ,  $\tau_{PC2} = C_2 R_{B1}$ ; **Заряд  $C_2$** :  $+E_K \rightarrow T_{1ЭБ} \rightarrow C_2 \rightarrow R_{K2} \rightarrow -E_K$ ,  $\tau_{3C2} = C_2 R_{K2}$ .  $\tau_{PC1, PC2} > \tau_{3C1, 3C2}$ , чтобы уменьшить фронт. Временные диаграммы:

$t_1 - t_2$  – время задержки выходного импульса, время рассасывания неосновных носителей в базе насыщенного транзистора.  $t_3 - t_2$  – этап подготовки,  $t_3 - t_4$  – этап регенерации.  $[0, t_1]$  –  $T_1$  – закрыт,  $T_2$  – открыт и насыщен;  $[t_1, t_2]$  –  $U_{B2} \uparrow \Rightarrow U_{K1} \uparrow$  – время рассасывания неосновных носителей в базе.  $[t_2, t_3]$  –  $U_{K2} \downarrow$ ,  $U_{B1} \downarrow$ .  $[t_3, t_4]$  –  $T_1$  начинает открываться,  $I_{K1} \uparrow$ ,  $U_{K1} \uparrow$  по знаку,  $|U_{K1}| < 0$ ,  $U_{B2} \uparrow$ ,  $T_2$  продолжает закрываться,  $I_{K2} \uparrow$ , идет лавинообразный процесс:  $T_1$  открывается и переходит в насыщенное состояние,  $T_2$  закрывается и переходит в режим отсечки.  $[t_5, t_6]$  – разряд  $C_1$ ,  $U_{B2} \downarrow$ ,  $[t_6]$  –  $T_2$  начинает открываться,  $I_{K2} \uparrow$ ,  $U_{K2} \downarrow$  по модулю,  $U_{B1} \uparrow$  и  $T_1$  начинает закрываться. Идет лавинообразный процесс:  $T_1$  – закрывается и переходит в режим отсечки,  $T_2$  – открывается и переходит в режим насыщения. **Минимальный период запускающего импульса**:  $T_{\min} = t_{\text{рассасыв}} + \tau_{ИМП2} + t_{\text{зад}}$ ,  $t_{\text{зад}} = \tau_{\text{рассас}} = t_2 - t_1$ ,  $\tau_{ИМП} = 0.69 C_1 R_{B2}$  - из прошлой лекции.  $t_{\text{восст}} = 2.3 \tau_{PC2} = 2.3 C_2 R_{B1}$ .

## МУЛЬТИВИБРАТОР С ЭМИТОРНОЙ СВЯЗЬЮ В АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОМ РЕЖИМЕ.

Преимущество: есть только одна емкостная связь  $\rightarrow$  напряжение на коллекторе устанавливается быстрее  $\rightarrow$  прямоугольная форма импульсов на выходе; импульсы на выходе несимметричные: большую часть периода  $T_2$  закрыт, меньшую  $T_2$  – открыт.

**Разряд С:**  $+C \rightarrow R_{B2} \rightarrow E_K \rightarrow R_{\Theta} \rightarrow T_1 \rightarrow -C$ ,  $\tau_{PC} = C \cdot (R_{K1} + R_{\Theta})$ . **Заряд С:**  $+E_K \rightarrow R_{\Theta} \rightarrow T_2 \rightarrow C \rightarrow R_{K1} \rightarrow -E_K$ ,  $\tau_{3C} = C \cdot (R_{K1} + R_{\Theta})$ .  $\tau_{PC} > \tau_{3C}$ . Пусть  $T_1$ - открыт,  $T_2$ - закрыт. Начинается разрядка С:  $U_{R_{B2}} \downarrow$ , т.к. заряд емкости С падает. Когда  $U_{B2} = U_{ОТПИР}$   $T_2$  начинает открываться,  $I_{K2} \uparrow$ ,  $U_{R_{\Theta}} \uparrow$ ,  $U_{B1} \uparrow$ , т.е.  $T_1$  начинает закрываться  $\Rightarrow I_{K1} \downarrow$ ,  $|U_{K1}| \uparrow$ , а по знаку более отрицательное,  $U_{B2} \downarrow$ . Лавинообразный процесс:  $T_1$  – закрывается,  $T_2$  – открывается и насыщается. Начинается зарядка С:  $I_{3C} \downarrow$ ,  $U_{R_{\Theta}} \downarrow$ ,  $U_{B1} \downarrow$ ,  $U_{B1} = U_{ОТПИР}$   $T_1$  - начинает открываться,  $U_{K1} \uparrow$ ,  $U_{B2} \uparrow$ ,  $T_2$  начинает закрываться. Идет лавинообразный процесс:  $T_1$  – открывается,  $T_2$  – закрывается. Временные диаграммы:

**Сами.....**

Данная схема может работать в ждущем режиме. В ждущем режиме  $T_1$  закрывается падением напряжения на  $R_{\Theta}$ , которое создается током открытого  $T_2$ , при правильном подборе параметров схемы. Схема имеет такой же вид, толь имеется цепь запуска.

### МУЛЬТИВИБРАТОР С ИСТОКОВОЙ СВЯЗЬЮ В АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОМ РЕЖИМЕ.

$T_1$  – открыт,  $T_2$  – закрыт. Идет **разряд С** по цепочке:  $+C \rightarrow T_1 \rightarrow R_{И} \rightarrow R_{31} \rightarrow -C$ ,  $\tau_{PC} = C \cdot (R_{И} + R_{31})$ .  $I_{PC} \downarrow$ ,  $U_{R_{C2}} \downarrow$ ,  $U_{R_{32}} = U_{ОТПИР}$ ,  $T_2$  начинает открываться,  $I_{СТОКТ2} \uparrow$ ,  $U_{RH} \uparrow$ ,  $T_1$  начинает закрываться.  $U_{C1}$  более положительный,  $U_{3T2} \uparrow$ . Идет лавинообразный процесс:  $T_1$  – закрывается,  $T_2$  – открывается.

Начинается **зарядка С:**  $+E_K \rightarrow R_{C1} \rightarrow C \rightarrow T_2 \rightarrow R_{И} \rightarrow -E_C$ ,  $\tau_{3C} = C \cdot (R_{C1} + R_{И})$ .  $I_{3C} \downarrow$ ,  $U_{RH} \downarrow$ ,  $T_1$  начинает открываться. Идет лавинообразный процесс:  $T_1$  – открывается,  $T_2$  – закрывается.

### МУЛЬТИВИБРАТОР С ИСТОКОВОЙ СВЯЗЬЮ В ЖДУЩЕМ РЕЖИМЕ.

$T_1$  - закрыт за счет тока открытого  $T_2$  при правильном подборе  $R_{И}$ . Импульсы на выходе прямоугольные и несимметричные. Входной запускающий импульс  $U_{ЗАПУСКА} > 0$ . Цепь **разряда С:**  $+C \rightarrow T_1 \rightarrow R_{И} \rightarrow R_{32} \rightarrow -C$ ,  $\tau_{PC} = C \cdot (R_{И} + R_{32})$ . **Заряд С:**  $+E_C \rightarrow R_{C1} \rightarrow C \rightarrow T_2 \rightarrow R_{И} \rightarrow -E_C$ ,  $\tau_{3C} = C \cdot (R_{C1} + R_{И})$ .

### АВТОГЕНЕРАТОР ПИЛООБРАЗНОГО НАПРЯЖЕНИЯ.

**Тиристор** – полупроводниковый прибор р-п-р-п типа или п-р-п-р типа и может переключаться из закрытого состояния в открытое под действием сигнала. У тиристора имеется на ВАХ участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Рассмотрим ВАХ тиристора:

Уравнение нагрузочной прямой:  $E = i_R R + U_T$ , на ВАХ построены нагрузочные прямые при разных значениях R, E.

**Для А:**  $i_R > i_T$  идет заряд С,  $U_T \uparrow$ , т.к. заряжается С. В точке «а»  $i_R = i_T$ ,  $i_C = 0$ .

**Для Б:**  $i_R > i_T$  идет заряд С,  $U_T \uparrow$ , т.к. заряжается С. В точке «б»  $i_R = i_T$ ,  $i_C = 0$ .

**Для В:** при включении тиристор скачком переходит из точки 4 в точку 3,  $i_R > i_T$  идет заряд С,  $U_T \uparrow$ , т.к. заряжается С. Когда  $U_T = U_{ВКЛ}$ , в точке 4, тиристор открывается,  $i_T$  резко возрастает,  $i_T > i_R$ , начинается разрядка С через тиристор. В точке «в»  $i_R = i_T$ .

**Для Г:**  $i_R > i_T$  идет заряд С,  $U_T \uparrow$ , т.к. заряжается С. В точке 4  $U_T = U_{ВКЛ}$ , тиристор открывается,  $i_T$  резко возрастает и переходит в точку 3, начинается разрядка С через тиристор,  $U_T \downarrow$ . В точке 2 тиристор выключается, ток через тиристор резко падает до точки 1, и все повторяется снова.

**Вывод:** схема работает как автогенератор пилообразного напряжения при условии, что E и R подобраны так, что нагрузочная прямая занимает положение «Г», пересекая ВАХ тиристора на участке с отрицательным дифференциальным сопротивлением. **Временные характеристики:**

Начинаем рассмотрение с точки  $t_1$ :  $t_2 - t_1 = t_{3AP}$ ;  $t_3 - t_2 = t_{PA3P}$ ;

$U_T(t - t_1) = U_{ВЫКЛ} + (E - U_{ВЫКЛ}) \cdot (1 - \exp(-\frac{t - t_1}{\tau_{3C}}))$  - заряд емкости на временной диаграмме,  $\tau_{3C} = RC$  - т.к.

заряд через R. Построим уравнение в точке включения, т.е.  $t = t_2$ .  $U(t_2 - t_1) = U_{ВКЛ}$ ;

$U_{ВКЛ} = U_{ВЫКЛ} + (E - U_{ВЫКЛ}) \cdot (1 - \exp(-\frac{t_2 - t_1}{R \cdot C}))$  - логарифмируем и определяем:

$$t_2 - t_1 = t_{3AP} = RC \ln \frac{E - U_{ВЫКЛ}}{E - U_{ВКЛ}}. \text{ Разряд емкости начиная с точки } t_2: U_T(t - t_2) = U_{ВКЛ} \cdot \exp\left(-\frac{t - t_2}{\tau_{PC}}\right),$$

$\tau_{PC} = R_0 \cdot C$  - т.к. С разряжается через тиристор,  $R_0$  – сопротивление открытого тиристора. При  $t=t_3$ :

$$U_T(t_3 - t_2) = U_{ВКЛ} \cdot \exp\left(-\frac{t_3 - t_2}{R_0 \cdot C}\right) = U_{ВКЛ}, \text{ логарифмируем: } t_3 - t_2 = t_{PC} = R_0 \cdot C \ln \frac{U_{ВКЛ}}{U_{ВЫКЛ}}. \text{ Период повторения:}$$

$$T = \tau_{3C} + \tau_{PC} = RC \ln \frac{E - U_{ВЫКЛ}}{E - U_{ВКЛ}} + R_0 \cdot C \ln \left(\frac{U_{ВКЛ}}{U_{ВЫКЛ}}\right).$$

### СИНХРОНИЗАЦИЯ АВТОГЕНЕРАТОРА ПИЛООБРАЗНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ВЫСОКО СТАБИЛЬНЫМ СИНУСОИДАЛЬНЫМ КОЛЕБАНИЕМ.

Используется термистор – имеет еще один управляющий электрод, на который подается

напряжение включения. ( $U_C$  - синхронизирующее напряжение)  $U_C = U_0 \pm \frac{1}{C} \int idt$ , если  $i = \text{const} = I$ , то

$U_C = U_0 \pm \frac{I}{C} t$  - линейная функция. Транзистор включается по схеме с общим эмиттером.

$U_C = U_m \cos \omega t$ . **Случаи:**

1)  $T_C < T_0$ , период синхронизирующих колебаний меньше периода собственных колебаний.

Описываем прямую:  $U_T(t - t_1) = U_{ВЫКЛ} + \frac{I}{C}(t - t_1) = U_{ВЫКЛ} + \frac{U_0 - U_{ВЫКЛ}}{T_0}(t - t_1)$ , фаза синхронизации:

$$\cos \varphi = \cos \omega t_1. U_{ВКЛ}(t_2) = U_0 + U_m \cos \omega t_2 = U_0 + U_m \cos \varphi;$$

$$U_T(t_2 - t_1) = U_{ВЫКЛ} + \frac{I}{C}(t_2 - t_1) = U_{ВЫКЛ} + \frac{U_0 - U_{ВЫКЛ}}{T_0}(t_2 - t_1) = U_{ВКЛ}(t_2); \cos \varphi = \frac{U_0 - U_{ВЫКЛ}}{U_m} \cdot \frac{T_C - T_0}{T_0}.$$

2)  $T_C > T_0$ , период синхронизирующих колебаний больше периода собственных колебаний.

$$\cos \varphi = \frac{U_0 - U_{ВЫКЛ}}{U_m} \cdot \frac{T_C - T_0}{T_0}. \text{ Вывод: фаза синхронизации зависит от соотношения амплитуды}$$

синхронизирующего колебания и от соотношения периодов повторения синхронизирующего колебания и собственного.

### ГЕНЕРАТОРЫ ЛИНЕЙНО ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ НАПРЯЖЕНИЯ (ГЛИН).

Работа основана на том, чтобы емкость заряжалась и разряжалась прямолинейно. Бывают последовательного и параллельного включения коммутирующего прибора.

#### ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ КОМУТИРУЮЩЕГО ПРИБОРА (транзистор).

Коммутирующий прибор работает в режиме запираения и  $U_{ВЫХ}$  – падающее, т.е. меняется линейно, т.к. ток через емкость постоянный (см. вывод ранее). Запирающее напряжение положительно. На входе запускающий импульс. В начальный момент времени транзистор открыт, поэтому на С

маленькое напряжение.  $U = \frac{E_K}{R_K + R_0} \cdot R_0$ ,  $R_0$  - сопротивление открытого транзистора, мало. Пока

импульса нет, транзистор открыт. **Временные характеристики:**

$t_{ВОССТ} = t_{ВКЛТР} + 2.3CR_0$ , период запускающего напряжения  $T_{ПИСКА} > t_{ВОССТ}$ . Длительность обратного хода пилы много меньше, чем прямого хода, т.е.  $\tau_{3C} \gg \tau_{PC}$ , поэтому С берут небольшое, а манипулируют  $R_K$ .

#### ГЛИН С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ВКЛЮЧЕНИЕМ КОМУТИРУЮЩЕГО ПРИБОРА.

Транзистор работает в режиме отпираения. Когда транзистор отпирается задержки нет, только при запираении есть задержка, т.к. в базе накапливаются неосновные носители.

$\varepsilon$  - коэффициент использования напряжения питания.  $\varepsilon = \frac{U_m}{E_K}$ ,  $\gamma$  - коэффициент нелинейности.

$$\gamma = \frac{I_{КНАЧ} - I_{КККО}}{I_{КНАЧ}} = \frac{U_m}{E_K - U_m} \approx \frac{U_m}{E_K}, E_K \gg U_m. I_{КННА} = \frac{E_K}{R_K}, \text{ т.к. транзистор открыт и его сопротивление}$$

мало.  $I_{КККО} = \frac{E_K - U_m}{R_K}$ . Чем выше линейное напряжение выхода, тем ниже коэффициент

использования.

### БЛОКИНГ ГЕНЕРАТОР.

- это однокаскадный усилитель с импульсным трансформатором в цепи положительной обратной связи. Может работать в ждущем режиме, автоколебательном, импульсном режиме, синхронизации и деления частоты. Используется в высоко частотных импульсных генераторах в качестве модуляторов и подмодуляторов. Минусы: низкая стабильность по частоте по сравнению с мульти вибратором и по форме импульсов, наличие импульсного трансформатора, т.е. нельзя микроминиатюризовать. **Плюсы:** короткие импульсы до 10 мкс, короткий фронт импульсов, до 1 мкс, возможность получать высокую пиковую мощность  $P_{ПИК} W/\tau$ , высокой скважности  $C = T/\tau$  и малой средней мощности  $P_{CP} = P_{ПИК}/C$ , где  $C$  – период повторений, возможно получать импульсы на выходе разной полярности и амплитуды, высокая надежность, низкое входное сопротивление.

### ПРОСТЕЙШИЙ ТРАНЗИСТРНЫЙ БЛОКИНГ-ГЕНЕРАТОР.

В начальный момент времени транзистор заперт +С емкости, которая заряжается в предыдущий период. Емкость разряжается через  $E_K$ , при этом начинает убывать напряжение на емкости и транзистор начинает отрываться. Идет изменение тока коллектора, работает обратная магнитная связь и транзистор лавинообразно открывается и уходит в режим насыщения. Начинает заряжаться емкость и транзистор начинает закрываться, опять появляется положительная обратная связь, транзистор закрывается и емкость заряжается.

Транзистор открывается «-» на базе.  $[0, t_0]$  – емкость  $C$  разряжается:  $+C \rightarrow R \rightarrow E_K \rightarrow -C, |U_C| \downarrow$ ,  $U_{БЭ} \approx U_C, U_{БЭ} \downarrow, U_{КЭ} \approx -E_K, U_{НАГ} = 0, [t_0] - U_{БЭ} = U_{ОТПИРТ} = 0$ , через транзистор течет ток  $I_K \uparrow$ , возникает переменный магнитный поток в сердечнике трансформатора за счет изменения  $I_K$  и в базовой обмотке наводится переменная, возрастающая ЭДС магнитной индукции. Замыкается обратная связь и начинается лавинообразный процесс: транзистор открывается и переходит в режим насыщения, формируется фронт импульса.  $[t_0, t_1]$  – фронт импульса. Напряжение на емкости не успевает сильно измениться.  $[t_1, t_1']$  – емкость заряжается током базы открытого насыщенного транзистора, положительная обратная связь разомкнута,  $U_{БЭ} \uparrow$ . В момент  $t_1'$  транзистор переходит в активный режим работы, т.е. он начинает закрываться,  $i_K \downarrow$  - переменный, возникает магнитный поток в сердечнике трансформатора, уменьшающийся, поэтому замыкается положительная обратная связь,  $U_{БЭ} \uparrow$ .  $[t_1', t_2]$  – формируется активная часть среза импульса.  $[t_2]$  – транзистор закрывается и переходит в режим отсечки.  $[t_2, t_3] - U_{КЭ} \downarrow$  и стремится к  $-E_K$  и формируется пассивная часть среза импульса. В момент  $[t_3]$  происходит выброс энергии, обратный хвост импульса, за счет рассеивания магнитной энергии, накопленной в сердечнике трансформатора. С  $[t_3, t_0']$  идет пауза, емкость  $C$  разряжается и все повторяется снова. В схеме в начальной обмотке стоит диод и дополнительное сопротивление для погашения паразитных колебаний и рассеивания части магнитной энергии через тепло, чтобы не сжечь коллекторный переход.

При отсутствии этой цепи возможен пробой коллекторного перехода. Т.к. блокинг-генератор работает с другими схемами, то в момент перехода (паузы)  $E_K$  может уменьшаться, для предотвращения этого в цепи ставят  $R_{ФИЛЬТРА}$  и  $C_{ФИЛЬТРА}$ , в паузу  $C_{Ф}$  заряжается и является дополнительным накопителем электрической энергии, а во время импульса  $C_{Ф}$  разряжается через транзистор, снижая потребление энергии от источника.  $R_{Б}, R_{К}$  – для ограничения токов, т.к. токи большие.

### ЖДУЩИЙ БЛОКИНГ-ГЕНЕРАТОР.

p-n-n запирается +.

R, C – чтобы уменьшить амплитуду запирающего импульса. C<sub>1</sub> – чтобы убрать переменную составляющую при обратной связи. «- +» на R<sub>1</sub> создает запирающее напряжение на транзисторе. Ждущий режим создается подачей запирающего напряжения на базу.

### СИНХРОНИЗИРОВАННЫЙ БЛОКИНГ-ГЕНЕРАТОР.

В автоколебательном режиме стабилизация по частоте у блокинг-генератора мала, и в целях ее повышения блокинг-генератор синхронизируют импульсом большей стабильности по частоте.

R<sub>1</sub> – определяют уровень срабатывания диода. T<sub>СИН</sub> < T<sub>СОБ</sub> – блокинг-генератор срабатывает каждый раз на синхронизирующий импульс.

### НЕЛИНЕЙНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ.

К простейшим нелинейным процессам относится нелинейное усиление, выпрямление, ограничение и стабилизация токов и напряжений, модуляция, детектирование, умножение, преобразование. Свойство всех нелинейных процессов в том, что происходит преобразование спектра сигнала.

**Модуляция** – это изменение одного параметра ВЧ колебания по закону f(t) – передаваемого сообщения.  $U = U_m \cos(\omega_0 t + \varphi)$ ;  $U_m = U_0 + \Delta U_m(t)$  - амплитудная модуляция,  $\omega_0 = \omega_0 + \Delta\omega_0(t)$  - частотная модуляция,  $\varphi = \varphi_0 + \Delta\varphi(t)$  - фазовая модуляция.

### АМПЛИТУДНАЯ МОДУЛЯЦИЯ –

Заключается в том, что амплитуда ВЧ гармонических колебаний изменяется в соответствии с передаваемым НЧ сигналом.  $U_{AM} = U_0 \cdot (1 + m \cdot f(t)) \cdot \cos \omega_0 t$ , U<sub>0</sub>, ω<sub>0</sub> - амплитуда и частота ВЧ колебаний, m - коэффициент модуляции, глубина модуляции, f(t) - НЧ передаваемое сообщение.

Пусть f(t) = cos Ωt - НЧ гармоническое колебание.  $U_{AM} = U_0 \cdot (1 + m \cdot \cos \Omega t) \cdot \cos \omega_0 t$ .  $m = \frac{U_{max} - U_{min}}{U_{max} + U_{min}}$ , При

этом m < 1 должно быть. Если m > 1, то наблюдается перемодуляция, т.е. огибающая не амплитудно-модулированных колебаний не повторяет форму кривой f(t) - НЧ колебаний.

Мощность  $P_{MAX} = \frac{1}{R} U^2 = P_0(1 + m)$ ,  $P_{MIN} = P_0(1 - m)$ . **Графическое представление амплитудно-модулированных колебаний:**

### СПЕКТР АМПЛИТУДНО-МОДУЛИРОВАННЫХ КОЛЕБАНИЙ.

$$U_{AM} = U_0 \cdot (1 + m \cdot \cos \Omega t) \cdot \cos \omega_0 t = U_0 \cos \omega_0 t + \frac{m}{2} U_0 \cos(\omega_0 + \Omega)t + \frac{m}{2} U_0 \cos(\omega_0 - \Omega)t.$$

**Векторное представление амплитудно-модулированных колебаний:**

Амплитудно-модулированные колебания по фазе совпадают с несущим колебанием (ω<sub>0</sub>t). Вектор U<sub>AM</sub> - это сумма трех векторов: U<sub>0</sub> - вектор несущего колебания, U<sub>B</sub> и U<sub>H</sub> - вектора боковых колебаний.

### СХМЫ РЕАЛИЗАЦИИ АМ.

Процесс модуляции состоит в перемножении двух функций: (U<sub>0</sub> cos ωt) и (1 + m cos Ωt). Поэтому напряжение на выходе должно быть пропорционально произведению двух напряжений.

**1) Линейная система с переменным параметром:**

$$e = E_m \cos \omega t, Y = Y_0 + k \cdot P_{ЗБ} - \text{проводимость микрофона, } P_{ЗБ} = \cos \Omega t. Y = Y_0 + k \cos \Omega t = Y_0 \left(1 + \frac{k}{Y_0} \cos \Omega t\right),$$

$$m = \frac{k}{Y_0} - \text{коэффициент модуляции. } i = e \cdot Y = Y_0(1 + m \cos \Omega t) \cdot U_m \cos \omega_0 t.$$

**2) Использование нелинейного сопротивления (диода).**

U<sub>1</sub> = U<sub>1</sub> cos Ωt, U<sub>2</sub> = U<sub>2</sub> cos ω<sub>0</sub>t. Описываем характеристику нелинейного элемента с помощью полинома:  $i = a_0 + a_1 \cdot (U_1 + U_2) + a_2 \cdot (U_1 + U_2)^2$ .  $i = a_0 + a_1 \cdot U_1 + a_1 \cdot U_2 + a_2 \cdot U_1^2 + a_2 \cdot U_2^2 + 2a_2 \cdot U_1 U_2$  - на выходе должно быть высокочастотное колебание и произведение U<sub>1</sub>U<sub>2</sub>. Подставляем U<sub>1</sub>, U<sub>2</sub>, при помощи НЭ необходимо выделить:  $i_{\omega_0} = a_1 U_2 \cos \omega_0 t + 2a_2 U_1 \cos \Omega t \cdot U_2 \cos \omega_0 t$ .

$i_{\omega_0} = a_1 U_2 \cos \omega_0 t \cdot \left( 1 + \frac{2a_2}{a_1} U_1 \cos \Omega t \right)$ , где  $m = \frac{2a_2}{a_1}$ .  $m$  больше, чем больше  $a_2$ , т.е. больше нелинейность

НЭ. На выходе  $R_{НЭ}$  нужно иметь LC- контур, чтобы отсечь ненужные гармоники. Контур должен быть настроен на  $\omega_0$ . Ширина модулированного сигнала должна быть меньше ширины пропускания контура, чтоб на выходе выделить только амплитудно-модулированные колебания.

.....

Т.к. несущая частота потребляет большую мощность  $\frac{2}{3}P$ , то используют схему балансной модуляции.

### **СХЕМА БАЛАНСНОЙ МОДУЛЯЦИИ.**