

# Аналоговая электроника.

Элементы ТАУ.

Понятие обратной связи.

Устойчивость замкнутых систем.

Генераторы.

# Системы регулирования.

**Система управления (регулирования)** – набор устройств позволяющих изменять параметры объекта регулирования (устройство или часть системы выполняющее какую-либо функцию) в соответствии с заданным законом управления.

**Система автоматического управления** не требует участия человека для работы. В системе автоматизированного управления рутинные процессы (сбор и анализ данных) выполняет автомат (программируемое устройство) но конечное решение по управлению системой принимает оператор.

Поведение объекта управления, определяется **выходными величинами**. Внешняя среда оказывает влияние на каждый объект управления. Это влияние называют **входными воздействиями**.

Входные воздействия разделяются на группы. Те из них, которые обеспечивают желаемое изменение поведения объекта, называются **управляющими**. Другие, мешающие достижению цели, называются **возмущающими воздействиями** или **помехами**.

# Классификация систем автоматического регулирования.

По задаче:

- системы стабилизации,
- системы программного управления (по заданной, известной заранее функции),
- следящие системы.

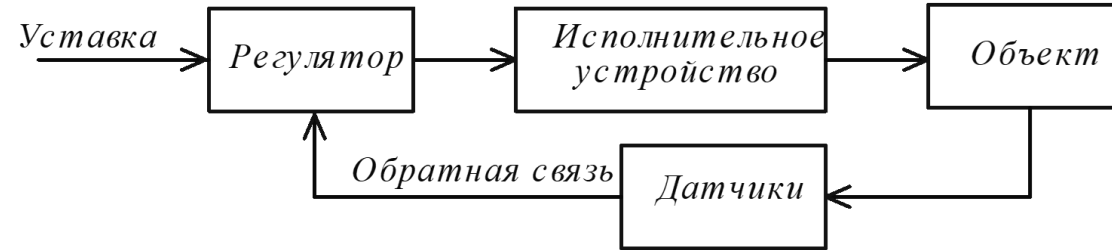
По наличию обратных связей:

- с отрицательной обратной связью (сигнал обратной связи вычитается из уставки),
- с положительной обратной связью,
- разомкнутые системы (обратная связь отсутствует).

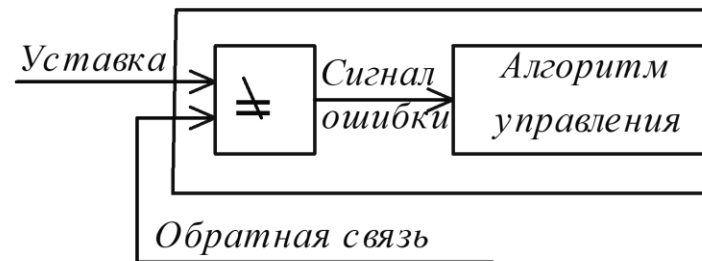
По вносимому в сигнал фазовому сдвигу системы делят на минимально и не минимально-фазовые.

# Системы автоматического регулирования.

## Структура системы управления



Разница входного управляющего воздействия (уставки) и выходного значения называется **ошибкой управления**. Устройство регулятора с управлением по ошибке:



## Понятие минимально-фазовых систем

Для минимально-фазовой системы, т.е. такой системы которая обеспечивает минимально возможный фазовый сдвиг, передаточная функция записывается следующим образом:

$$W(s) = \frac{(s + b_m)(s + b_{m-1}) \cdots (s + b_1)}{(s + a_n)(s + a_{n-1}) \cdots (s + a_1)}$$

Отсюда видно, что система является минимально-фазовой, если нули и полюса ее передаточной функции лежат в левой полуплоскости комплексной плоскости. При этом действительные части корней полиномов будут меньше нуля, что означает затухающий характер всех процессов протекающих в системе.

## Понятие минимально-фазовых систем

Для не минимально-фазовой системы в свою очередь запишем:

$$W(s) = \frac{(s - b_m)(s + b_{m-1}) \cdots (s + b_1)}{(s + a_n)(s + a_{n-1}) \cdots (s + a_1)}$$

Преобразуем выражение:

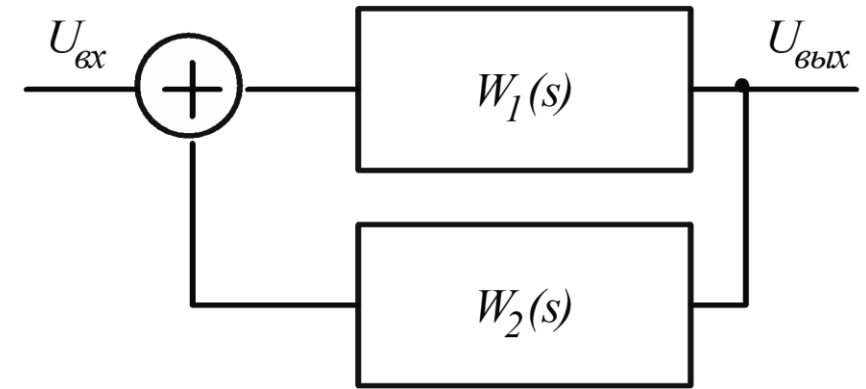
$$W(s) = \frac{(s + b_m)(s + b_{m-1}) \cdots (s + b_1)}{(s + a_n)(s + a_{n-1}) \cdots (s + a_1)} \cdot \frac{(s - b_m)}{(s + b_m)}$$

Здесь видно, что к функции минимально-фазовой системы добавлено еще одно звено, со своим фазовым сдвигом. Особенностью не минимально-фазовой системы является то, что нет однозначной связи между фазовой и амплитудной частотными характеристиками.

## Замкнутые системы.

Передаточная функция для замкнутой системы (системы с обратной связью):

$$W(s) = \frac{W_1(s)}{1 - W_1(s)W_2(s)}$$



Особая точка (полюс передаточной функции):

$$W_1(s)W_2(s) = 1$$

# Понятие устойчивости

**Условие устойчивости системы** заключается в том, что после прекращения действия внешних возмущений система возвращается в исходное состояние.

$$a_n \frac{d^n U(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} U(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_0 U(t) = 0$$

$$U(t) = \sum_{i=1}^n C_i e^{p_i t}$$

Это означает, что корни характеристического уравнения должны быть либо отрицательными действительными либо комплексными с отрицательными действительными частями.

**Критерий устойчивости : система устойчива, если действительные части всех корней характеристического уравнения отрицательны (алгебраический критерий).**



# Критерий устойчивости

$$W(s) = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0}$$

Корни характеристического уравнения являются полюсами передаточной функции. Передаточная функция не должна иметь полюсов в правой комплексной полуплоскости. Т.е. произведение  $W_1(s)W_2(s)$  не может быть равно 1.

Для упрощения работы составлен критерий определения устойчивости по АФЧХ:

***если при изменении частоты от 0 до  $\infty$  фаза не достигает значения  $180^\circ$ , цепь устойчива при любом значении модуля коэффициента передачи, либо если модуль коэффициента передачи меньше 1 то цепь устойчива при любом значении фазы.***

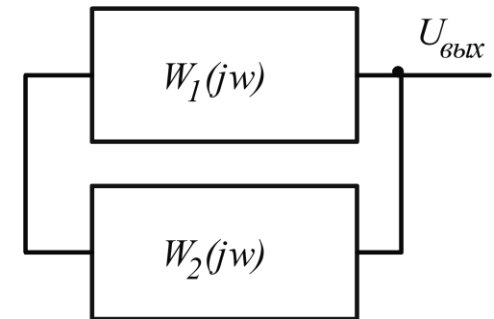
**Эти утверждения верны только для минимально фазовых цепей.**

# Генераторы

**Генератор** – это устройство, не имеющее входного сигнала, но производящее на выходе сигналы определенной формы и частоты. Условие возникновения генерации (нестабильное состояние схемы) получим из выражения для коэффициента усиления схемы с обратной связью:

$$W_1(j\omega)W_2(j\omega) = 1$$

Это соотношение называют критерием Баркгаузена.



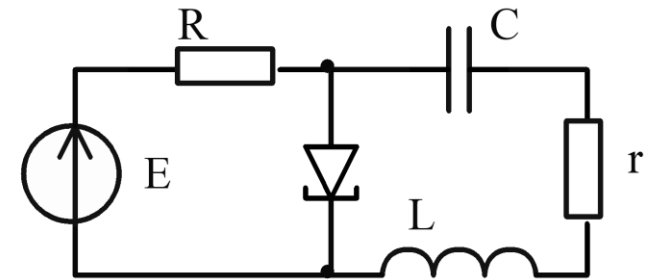
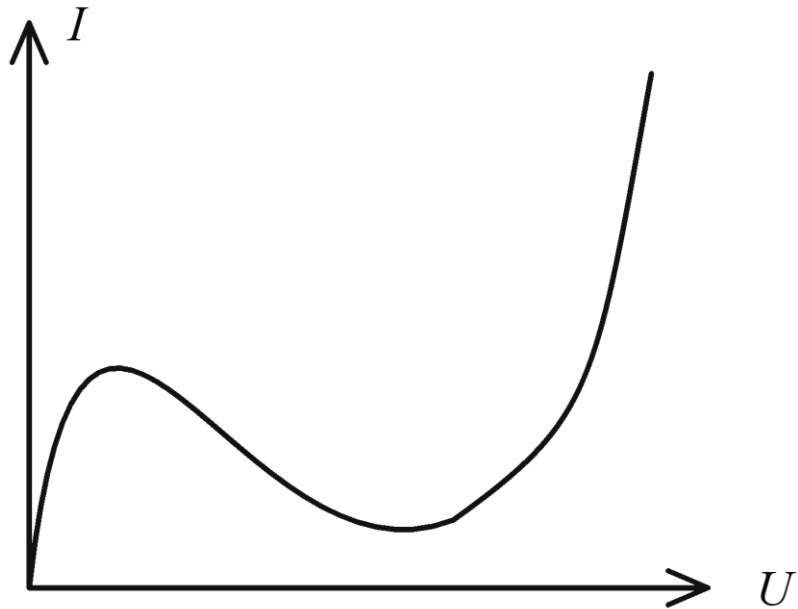
$$|W_1||W_2| = 1, \quad \text{и} \quad \varphi = 0; 2\pi; \dots$$

Эти соотношения называются балансом амплитуд и балансом фаз соответственно. Баланс амплитуд означает, что незатухающие колебания в замкнутом контуре могут существовать когда усилитель компенсирует потери в схеме обратной связи. Условие баланса фаз означает, что восполнение энергии в системе производится в такт ее собственным колебаниям.

# Генератор с компенсацией потерь

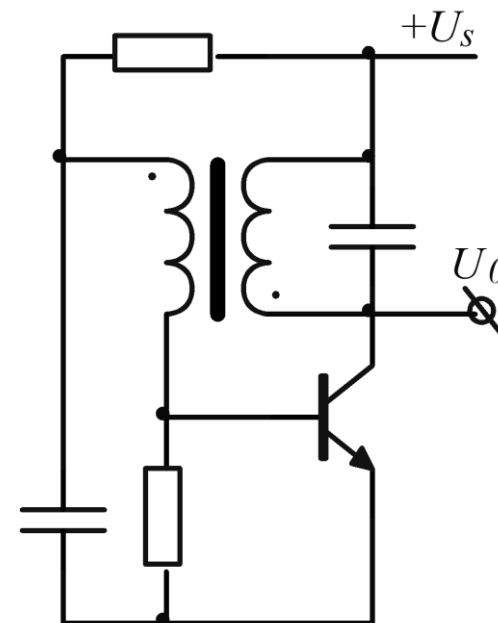
Компенсацию потерь можно реализовать за счет устройства с отрицательным сопротивлением (тунельный диод).

$$R_{\text{диф}} = \frac{dU}{dI}$$



## Генераторы на основе резонансного контура.

Простейший генератор на транзисторе с трансформаторной обратной связью. Частота колебаний определяется собственной частотой контура и добротностью цепи.



# Генераторы на основе резонансного контура.

Генератор на основе ОУ. Для узла по правилу Кирхгофа:

$$\frac{U_1 - U_0}{R} + C \frac{dU_0}{dt} + \frac{1}{L} \int U_0 dt = 0$$

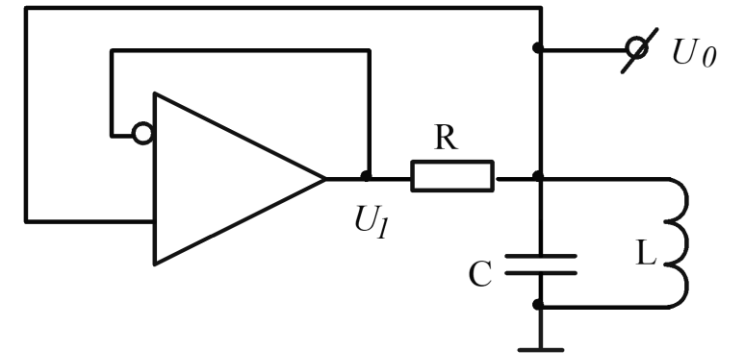
Продифференцируем разделим на  $C$  и учтем, что  $U_1 = kU_0$ , здесь  $k$  коэффициент передачи ОУ

$$\frac{d^2 U_0}{dt^2} + \frac{k - 1}{RC} \cdot \frac{dU_0}{dt} + \frac{1}{LC} U_0 = 0$$

Решение этого уравнения:

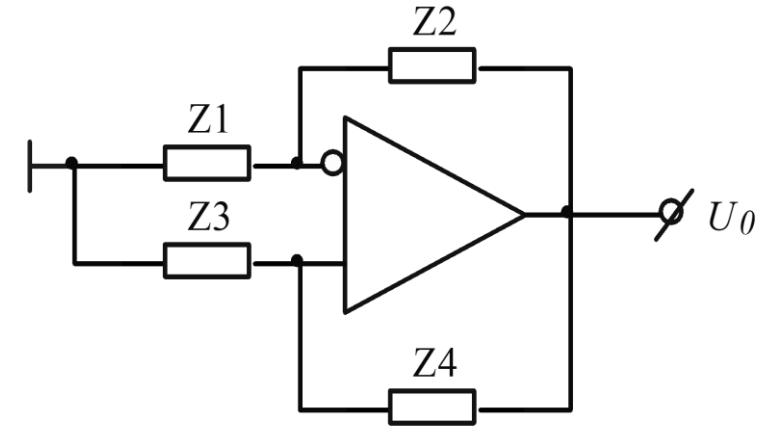
$$U_0 = A e^{-\frac{k-1}{2RC}t} \sin\left(\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{k-1}{2RC}}t\right)$$

Видно что при  $k$  равном 1 колебания не затухающие и с фиксированной частотой.



# Генераторы синусоидального сигнала с использованием отрицательных и положительных обратных связей

$$U_0 = U_- \left( 1 + \frac{Z_2}{Z_1} \right) \quad U_+ = U_0 \frac{Z_3}{Z_3 + Z_4}$$



Если разорвать ветвь между выходом и  $Z_4$ ,  
и подать на нее входной сигнал  $U_1$  то:

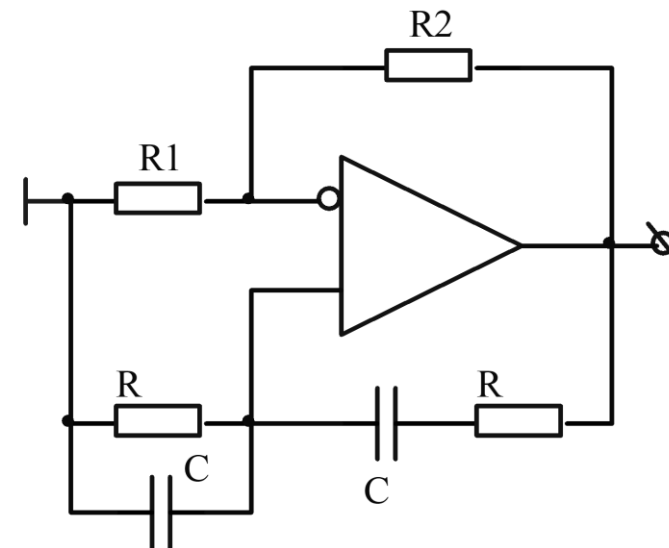
$$U_0 = U_1 \left( 1 + \frac{Z_2}{Z_1} \right) \frac{Z_3}{Z_3 + Z_4} \quad \text{и} \quad W(j\omega) = \frac{U_0}{U_1} = \left( 1 + \frac{Z_2}{Z_1} \right) \frac{Z_3}{Z_3 + Z_4}$$

Полученная ЧПФ должна удовлетворять критерию Баркгаузена.

# Генераторы синусоидального сигнала

Для схемы генератора на основе **моста Вина** :

$$W(j\omega) = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{1}{1 + \frac{R_3}{R_4} + \frac{C_2}{C_1} + j(\omega R_3 C_1 - \omega R_4 C_2)}$$

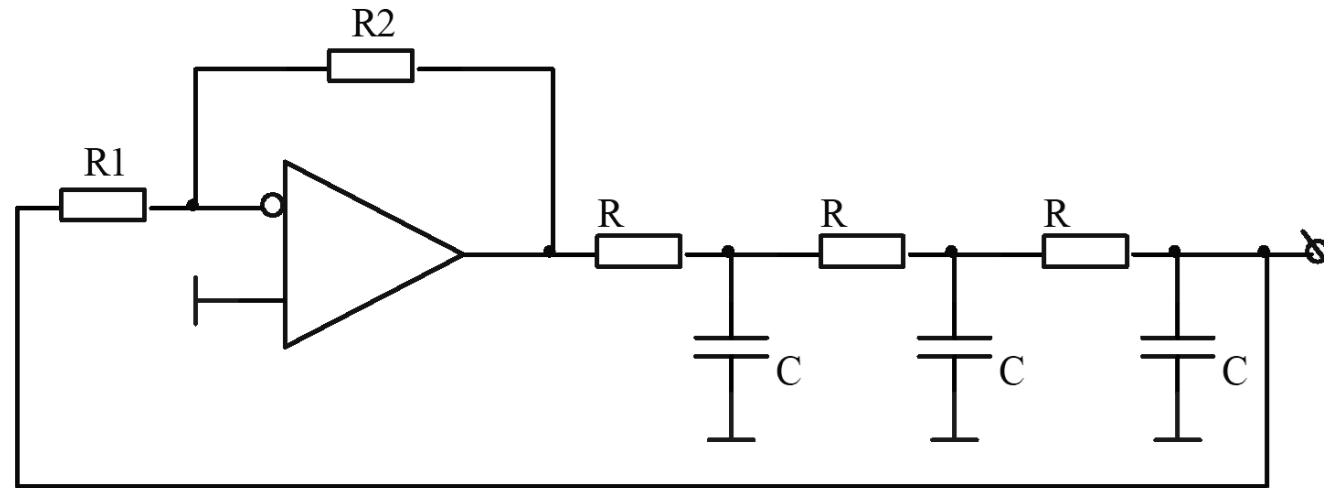


При  $C_1=C_2=C$  и  $R_3=R_4=R$ , все слагаемые с  $\omega$  в уравнении сократятся.

$$W_2 = 1/3, W_1 = 3, \omega = 1/RC.$$

# Генераторы синусоидального сигнала

Генератор на основе фазосдвигающей цепи.



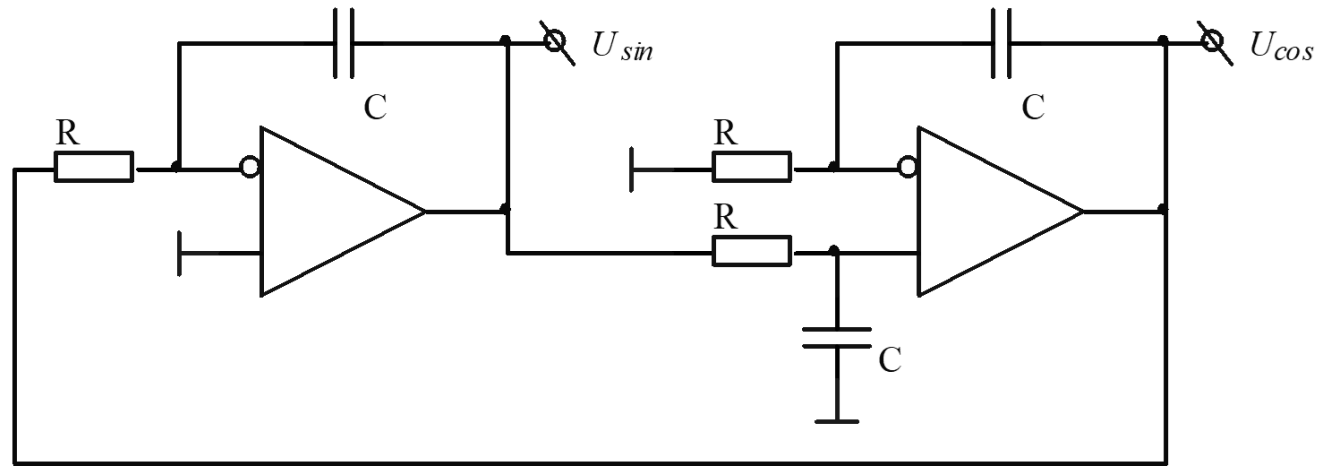
Для расчета принимается, что фазосдвигающие звенья являются независимыми друг от друга и каждое звено сдвигает фазу на  $60^\circ$ . Это будет при  $\omega = \sqrt{3}/RC$ , тогда  $|W_2| = (1/2)^3$  и  $R2 = 8 \cdot R1$ . В реальности условие независимости не выполняется, и коэффициент усиления и частота будут отличаться от указанной.



# Генераторы синусоидального сигнала

**Квадратурный генератор.** Каждое RC звено вносит фазовый сдвиг по  $90^\circ$ . Идея квадратурного генератора лежит в использовании того факта, что двойное интегрирование синусоиды даёт инвертирование синусоидального сигнала, то есть происходит сдвиг сигнала по фазе на  $180^\circ$ .

$$W(s) = \frac{1}{sRC} \cdot \frac{1}{sRC} \Rightarrow W(j\omega) = \left(\frac{1}{j\omega RC}\right)^2$$



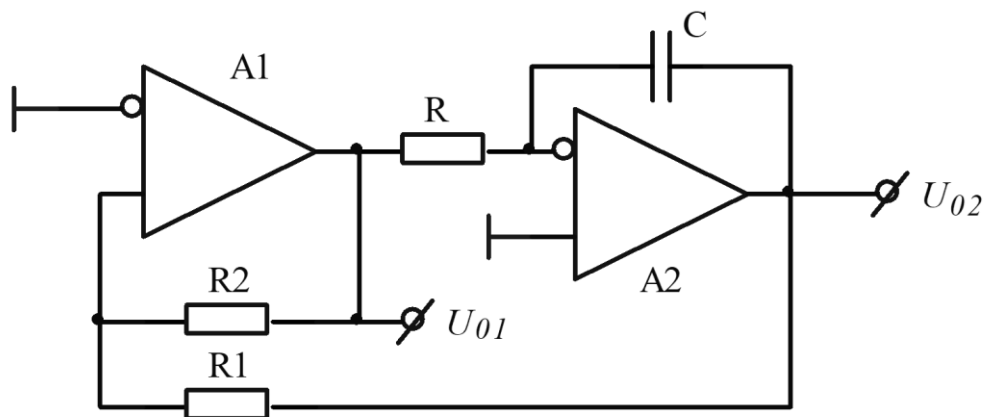
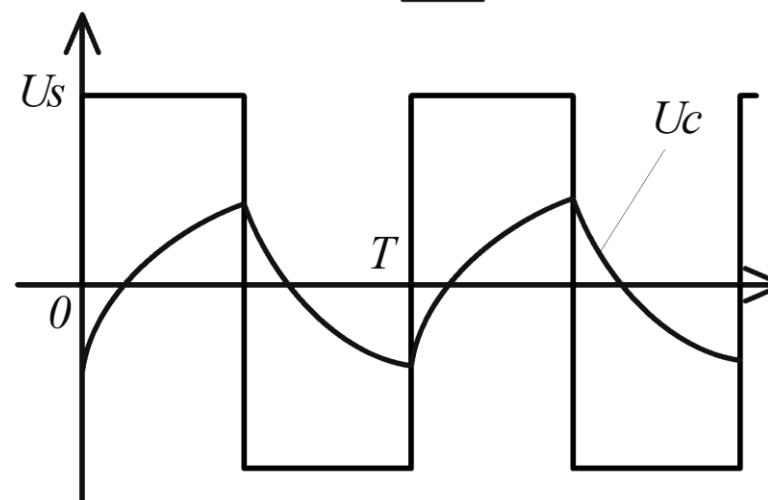
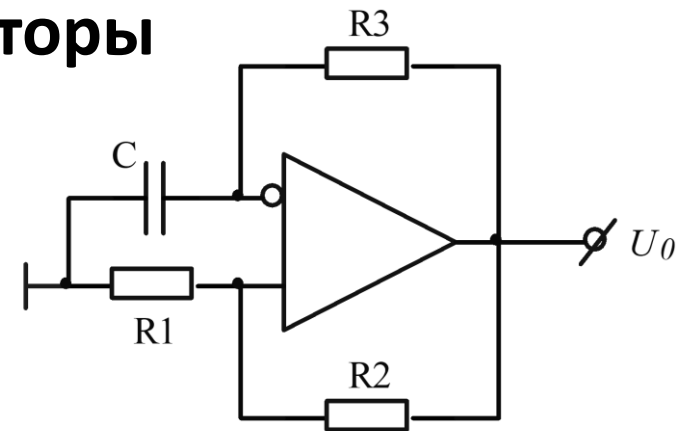
Колебания возникают на частоте:  $\omega = 1/RC$ .

# Релаксационные генераторы

$$C \frac{dU_C}{dt} = \pm \frac{U_S - U_C}{R}$$

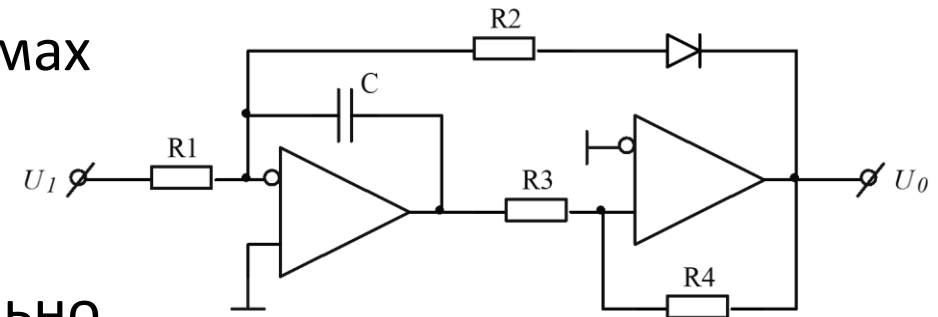
$$U_C = U_S - (U_S + U_S \frac{R1}{R1 + R2}) e^{-t/RC}$$

$$T = 2RC \cdot \ln(1 + \frac{2R1}{R2})$$



# Генераторы управляемые напряжением

**ГУН (Voltage Controlled Oscillator - VCO)** – устройство, выходная частота которого зависит от величины управляющего напряжения. Используются в системах ФАПЧ, системах приема-передачи сигналов и т.д.



ГУН на основе ОУ. Скорость заряда  $C$ , а следовательно и частота определяется напряжением  $U_1$ .

На основе **варикапа**. На этой схеме можно построить простейший модулятор ЧМ сигнала ( $U_1$  - информационный сигнал).

