

# Цифровые средства измерения

Отличия от аналоговых СИ

- наличие АЦП, ЦАП;
- работа с цифровым кодом

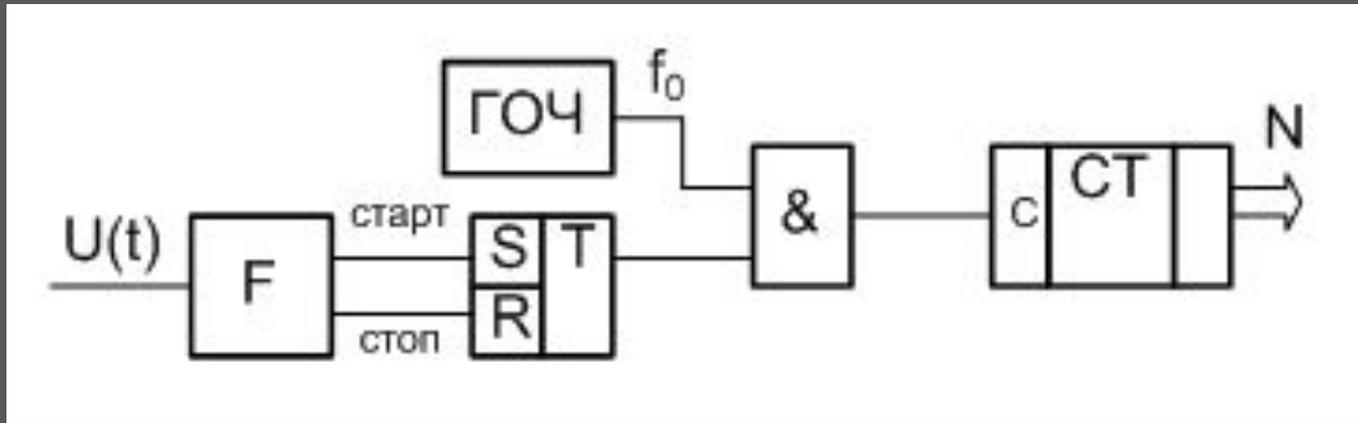
Виды ЦСИ

- с промежуточным аналоговым преобразованием
- без промежуточным аналоговым преобразованием

В цифровой код могут быть преобразованы непосредственно

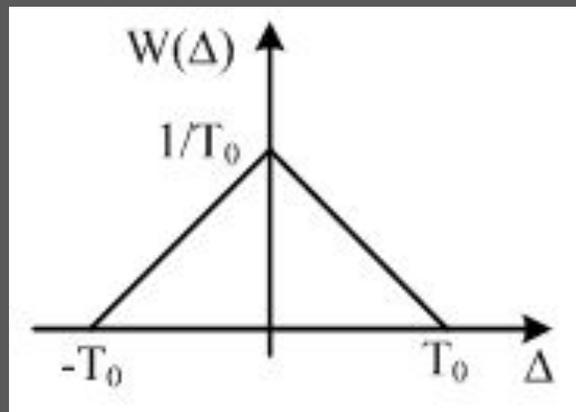
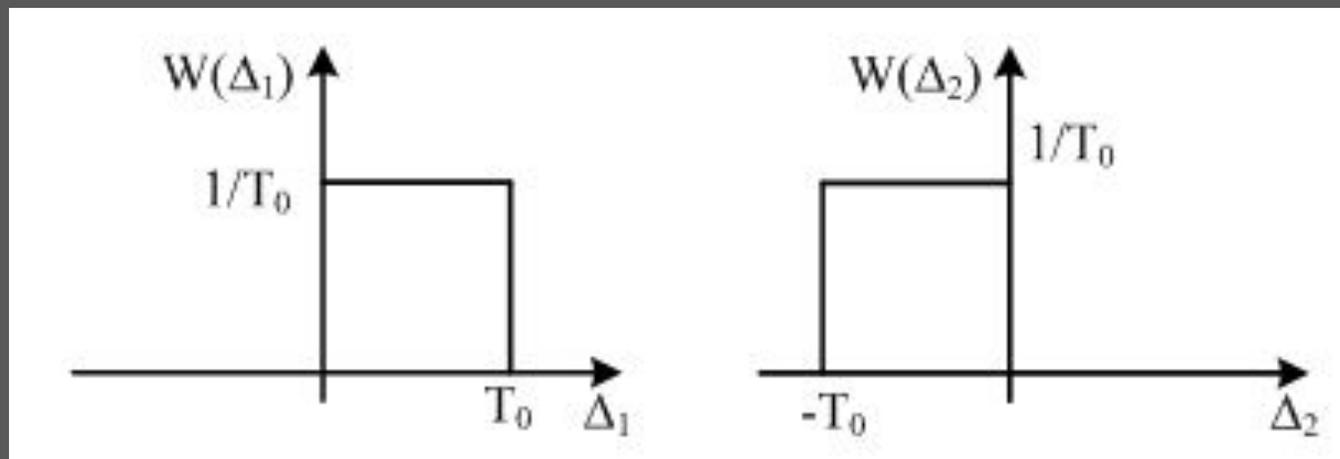
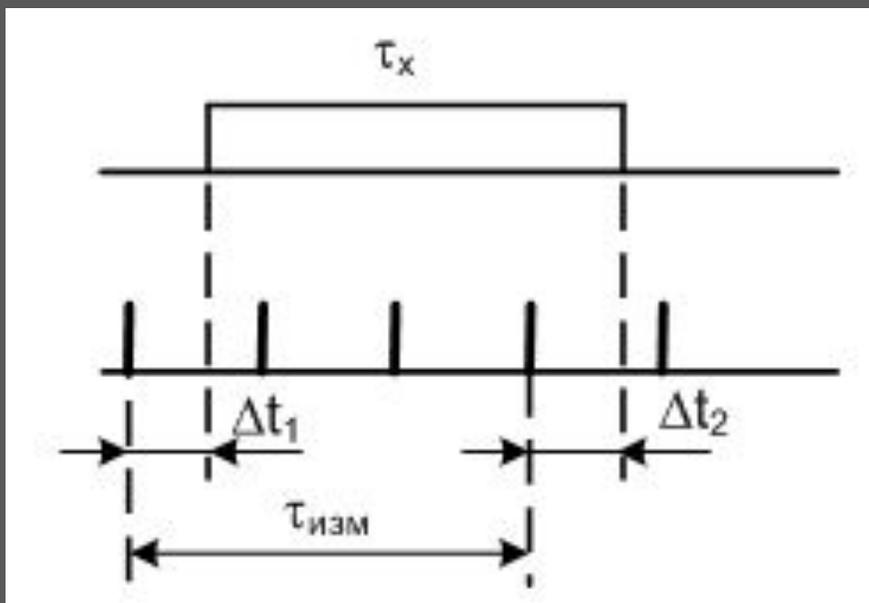
- интервал времени;
- частота;
- фаза;
- напряжение;
- угловое и линейное перемещение;
- параметры цепей  $R$ ;
- ток  $I$

# Схема измерения временного интервала



$$N = \int_0^{\tau_x} f_0 dt = f_0 \int_0^{\tau_x} dt = f_0 \tau_x = \frac{\tau_x}{T_0}$$

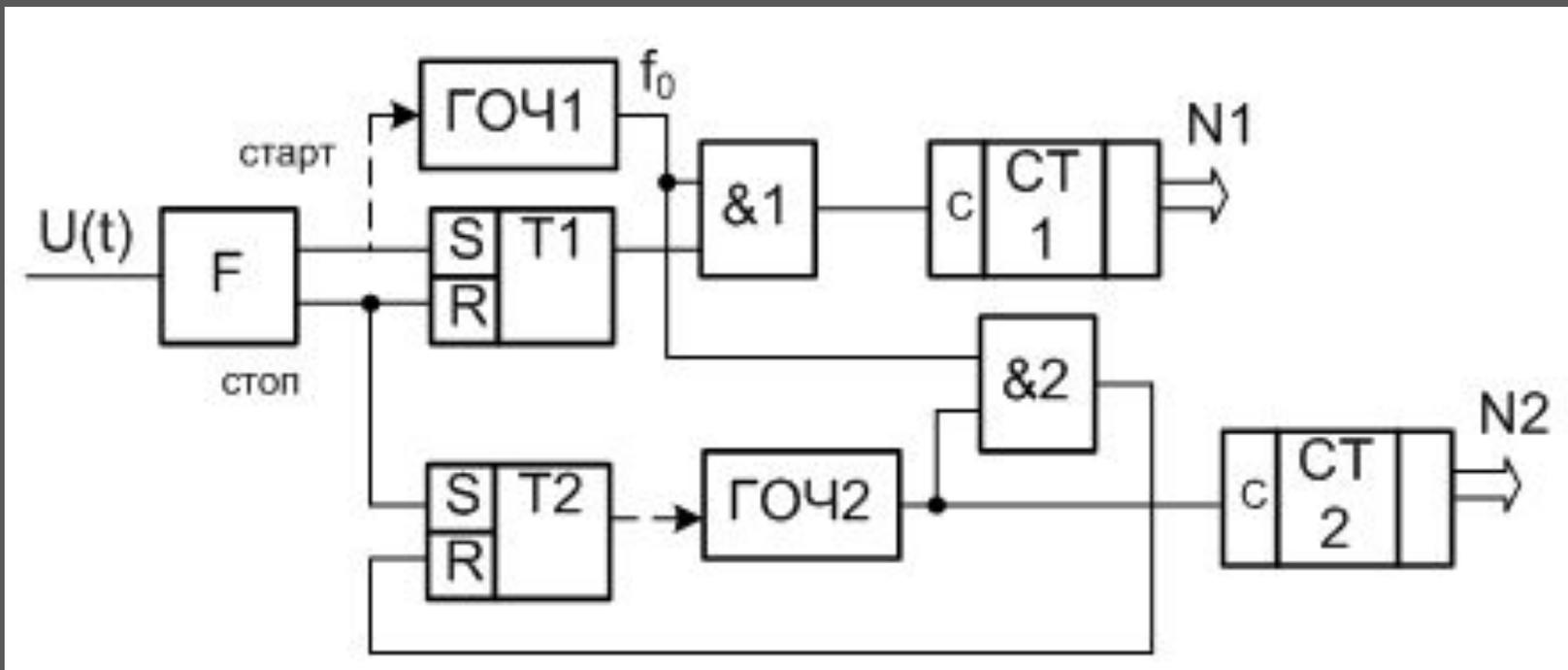
# Погрешности при измерении временных интервалов



# Методы снижения методической погрешности измерения временных интервалов

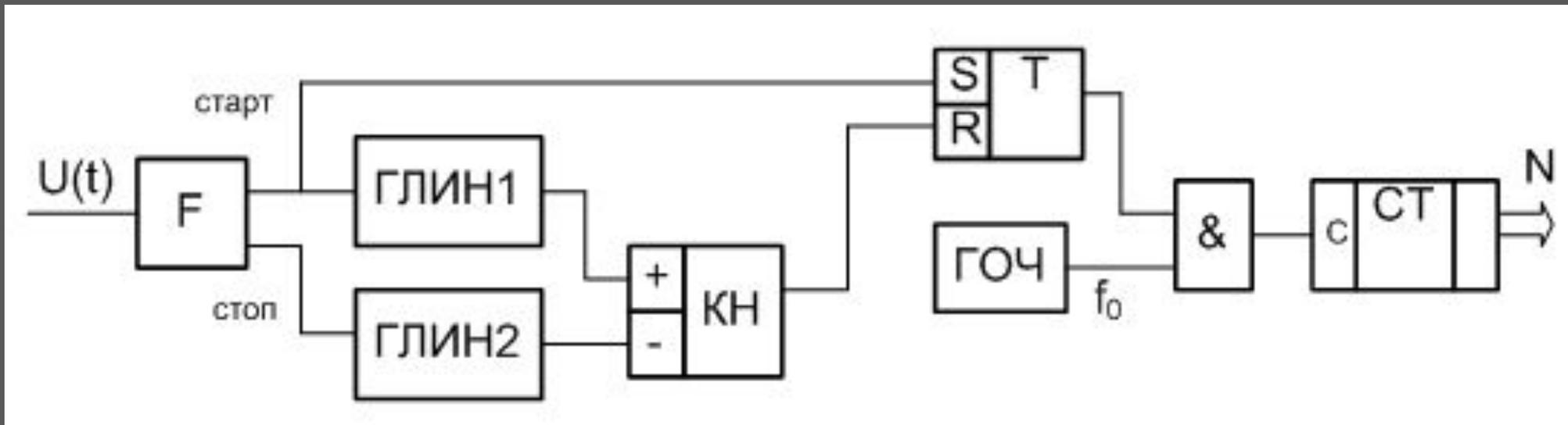
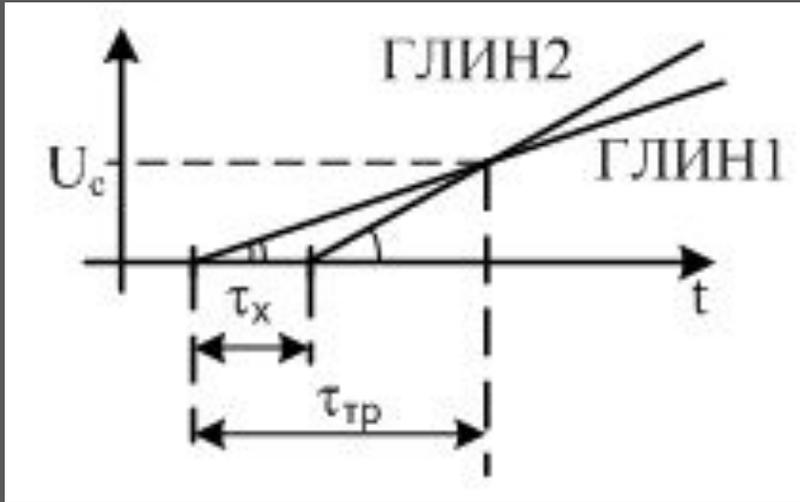
- Повышение частоты
- Синхронизация ГОЧ с старт-импульсом
- Нониусный метод
- Метод трансформации времени
- Прочие методы (метод регрессирующих совпадений, метод задержанных совпадений и др.)

# Нониусный метод

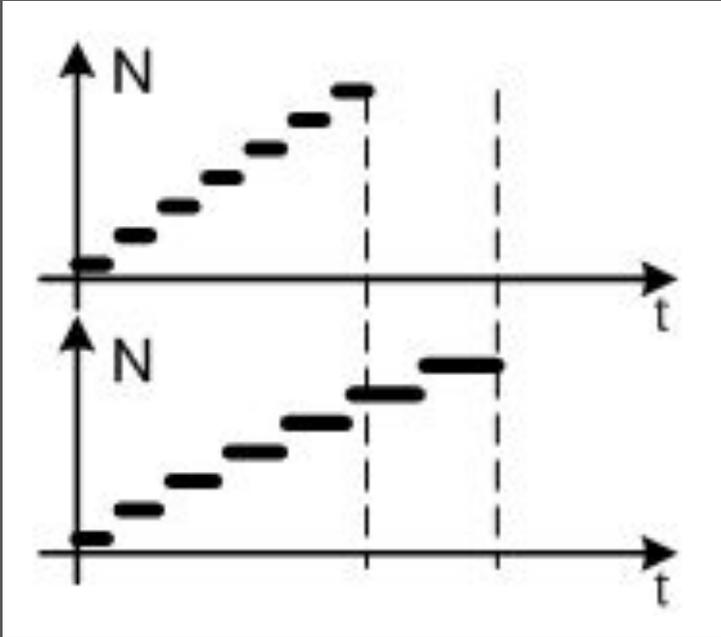


$$f_{bc} = \frac{Q^k}{Q^k - 1} f_0$$

# Метод трансформации времени

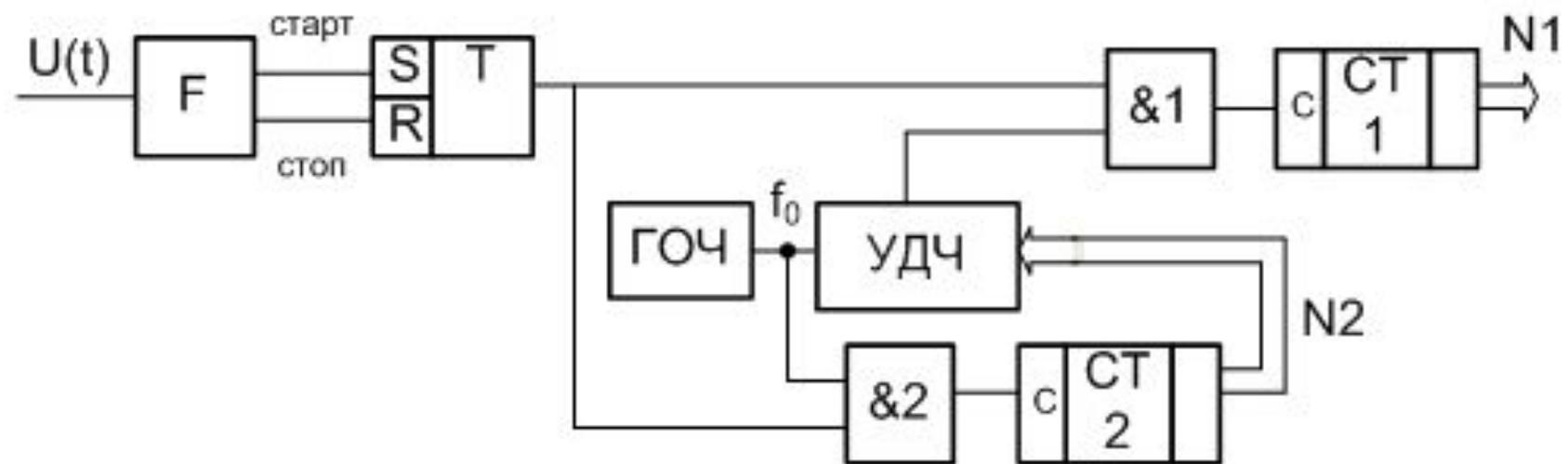


# Неравномерное квантование в цифровых измерителях времени



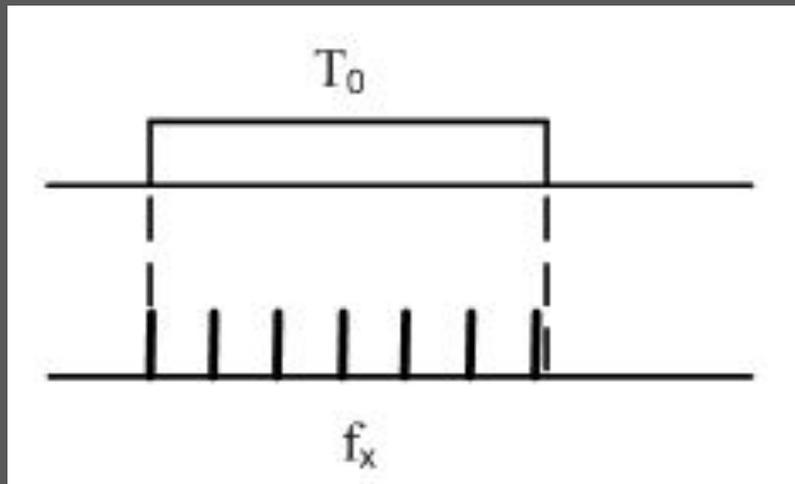
$$N = \int_0^{\tau_x} f(t) dt \quad N_x = F(\tau_x) \quad f(t) = F'(\tau_x)$$

$$F(\tau_x) = \ln(1 + \tau_x) \rightarrow f(\tau_x) = \frac{f_0}{1 + \tau_x f_0}$$

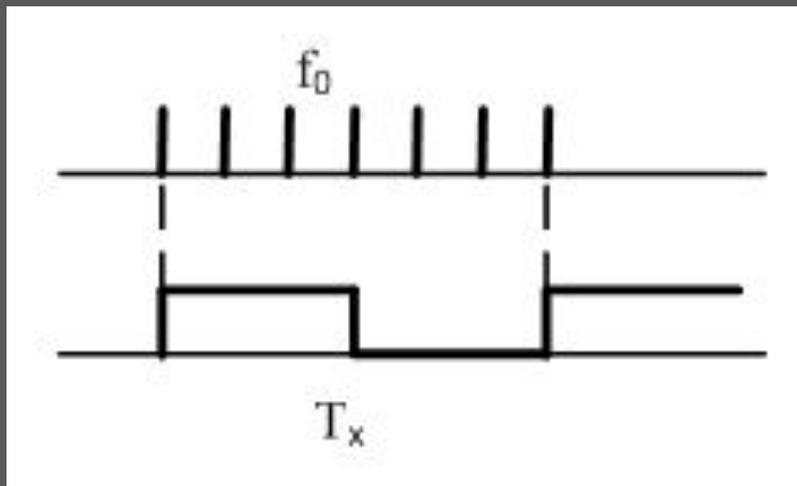


# Цифровые частотомеры

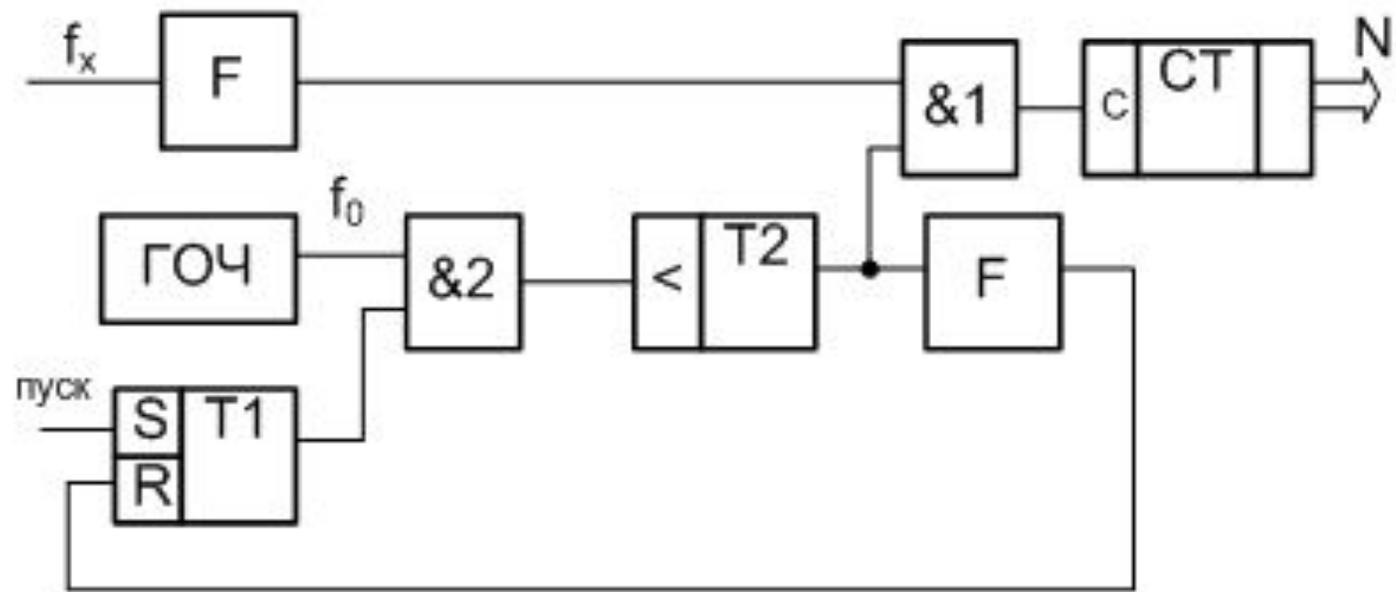
## 1. Метод единичных приращений



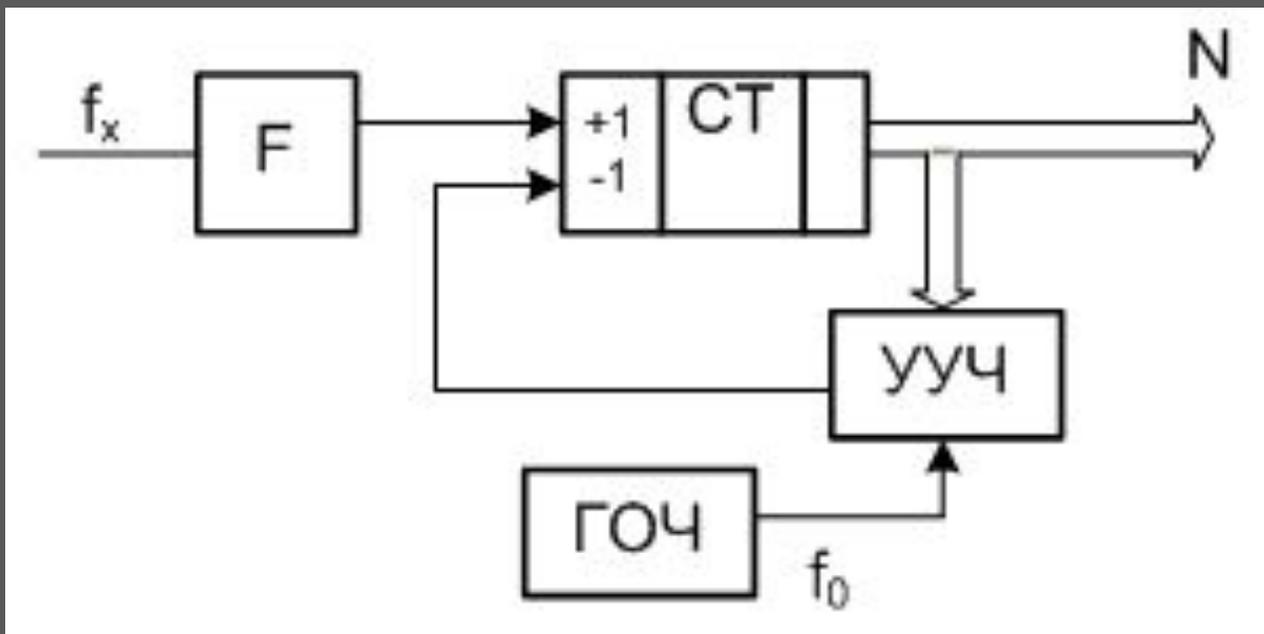
ВЫСОКИХ ЧАСТОТ



НИЗКИХ ЧАСТОТ



## 2. Компенсационный метод измерения частоты



### 3. Измерение частоты методом сравнения (метод фигур Лиссажу и метод яркостной модуляции)

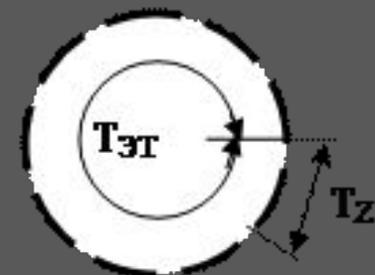
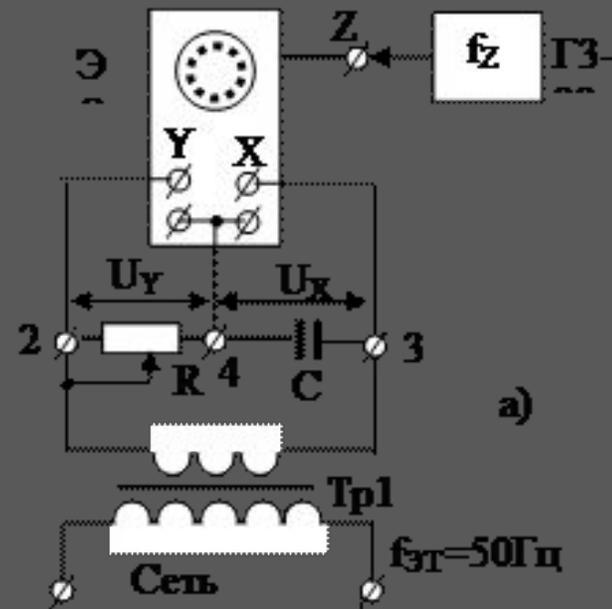
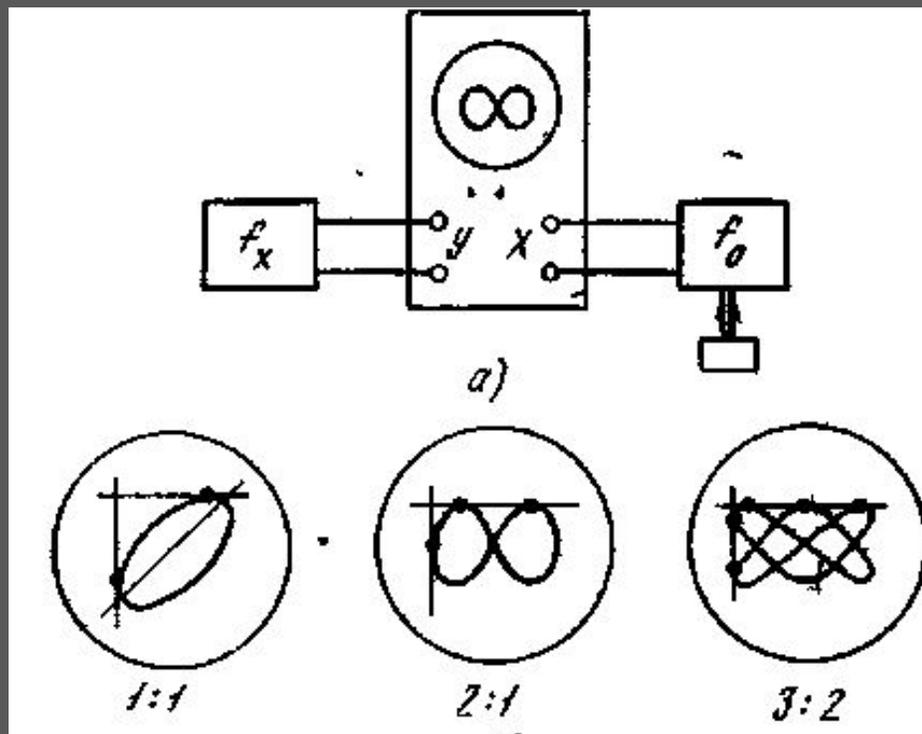


Рис. 3.5.

$$\frac{f_y}{f_x} = \frac{n_x}{n_y}$$

$$f_x = \frac{f_0}{n}$$

# Цифровые фазометры

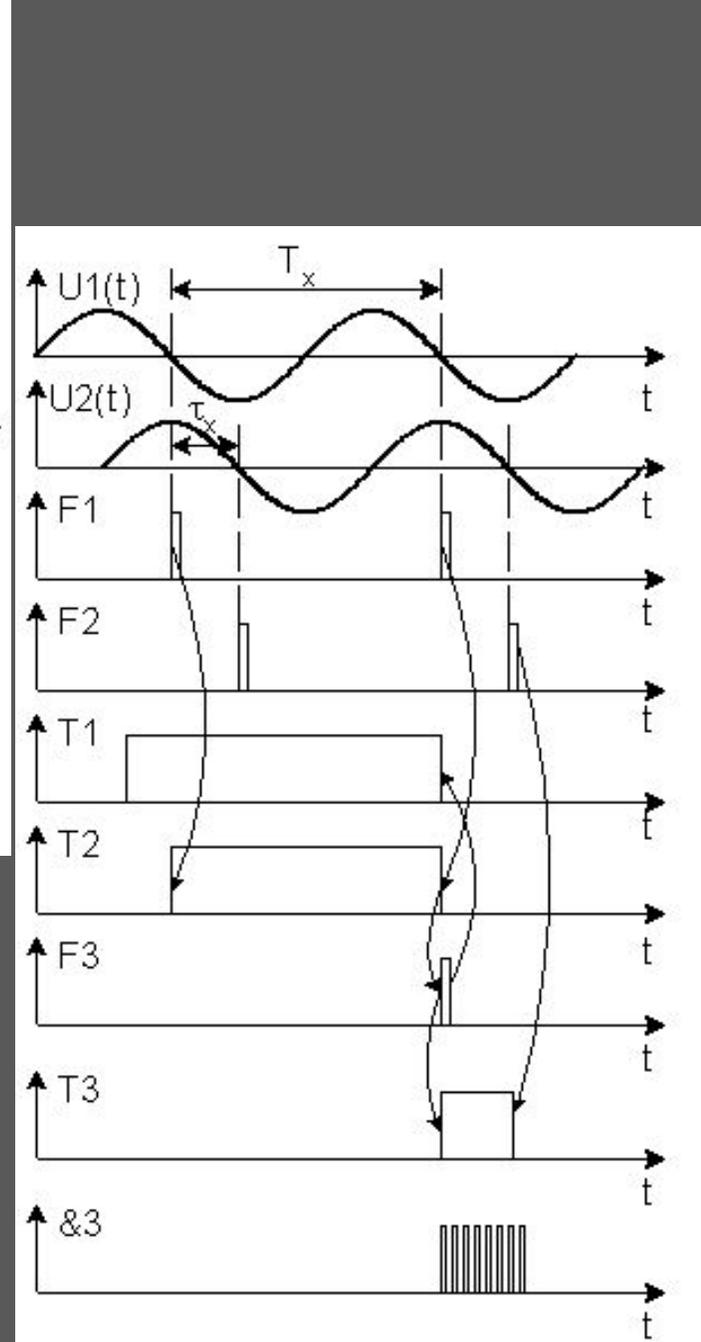
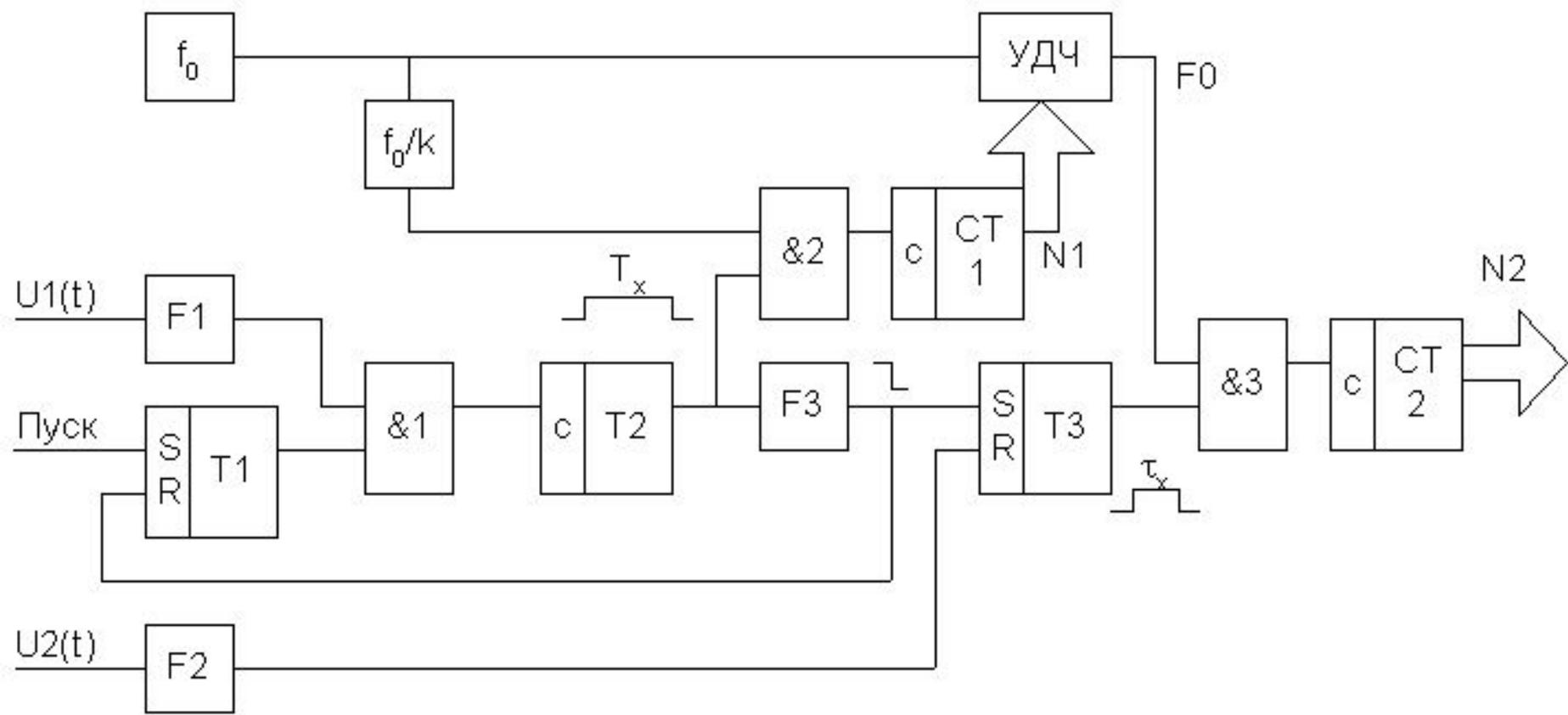
Фаза в общем случае  $\Delta\Phi = (\omega_2 - \omega_1)t + (\varphi_2 - \varphi_1)$

Фаза при равенстве частот  $\varphi_2 = \omega t_1 = 2\pi f t_1 = 2\pi \frac{t_1}{T}$

## Фазометр мгновенного значения

Алгоритм работы

1. Вычислить период
2. Вычислить интервал времени между началами периода
3. Найти отношение интервала времени к периоду
4. Выполнить масштабирование

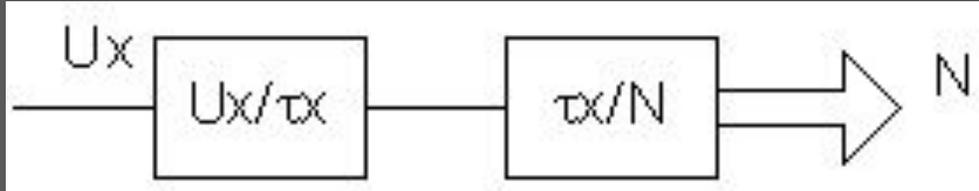


$$N_1 = \int_0^{T_x} \frac{f_0}{k} dx = \frac{f_0 T_x}{k} \quad F0 = \frac{f_0}{N_1} = \frac{f_0 k}{f_0 T_x} = \frac{k}{T_x}$$

$$N_2 = \int_0^{\tau_x} F0 dx = \tau_x F0 = \frac{\tau_x k}{T_x}$$

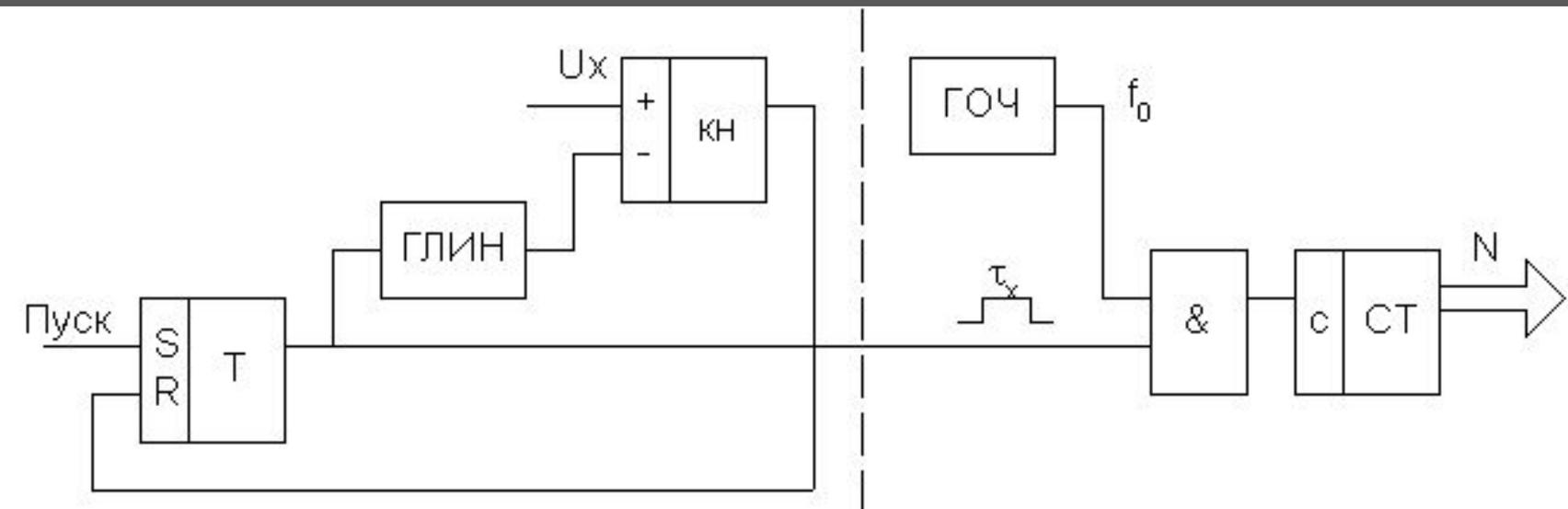
# АЦП напряжения

## 1. По методу единичного приращения



### 1.1 АЦП время импульсного кодирования с однократным компарированием

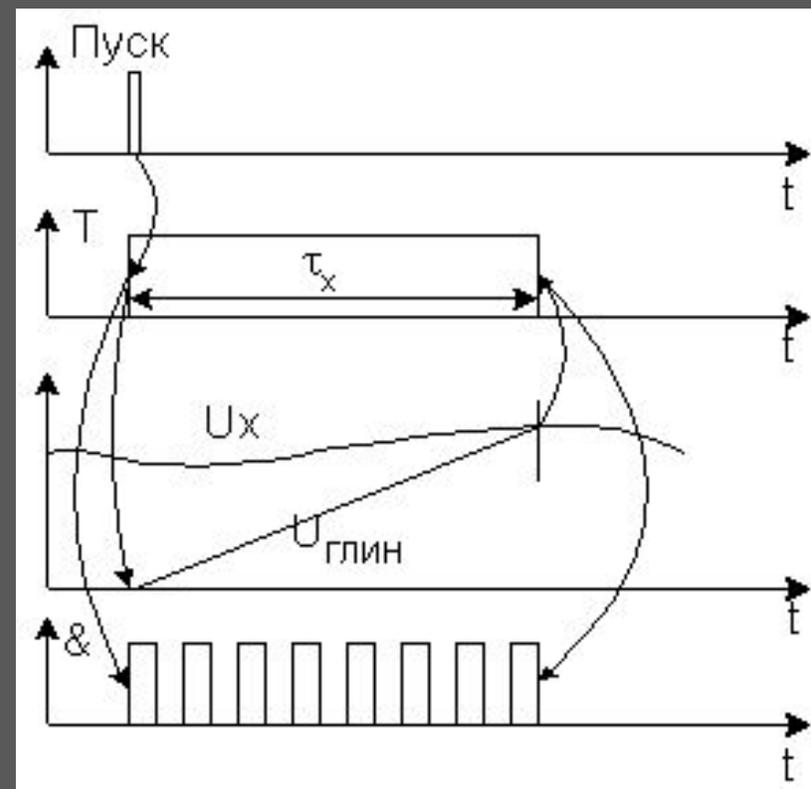
# 1.1 АЦП время импульсного кодирования с однократным компарированием



$$N = \int_0^{\tau_x} f_0 dx = f_0 \tau_x$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{U_x}{\tau_x}$$

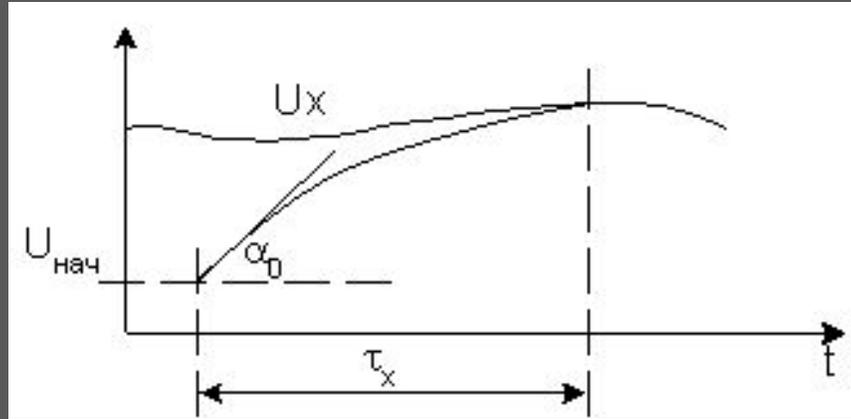
$$N = f_0 \frac{U_x}{\operatorname{tg} \alpha} = k U_x$$



# Погрешности

## 1. Нелинейность ГЛИН

$$U_{\text{ГЛИН}} = U_{\text{нач}} + \text{tg}\alpha t_1 + F_{\text{нел}}(t)$$

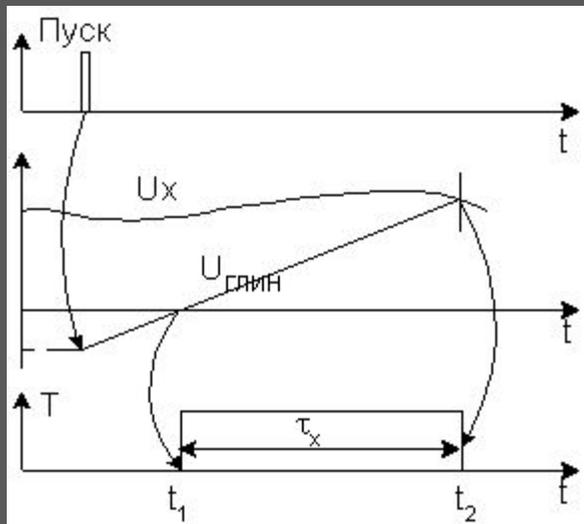
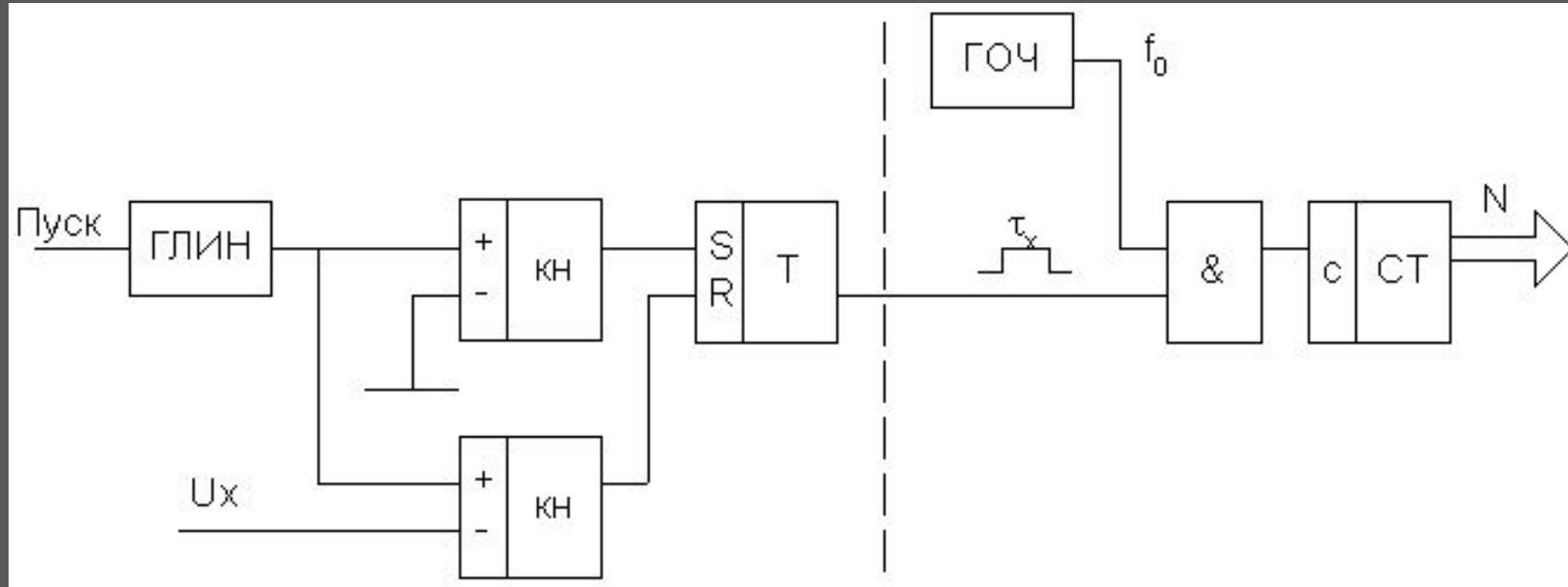


2. Погрешность компарирования (сравнения)

3. Погрешность квантования

4. Неточность и нестабильность ГОЧ

## 1.2 АЦП время импульсного кодирования с двухкратным компарированием

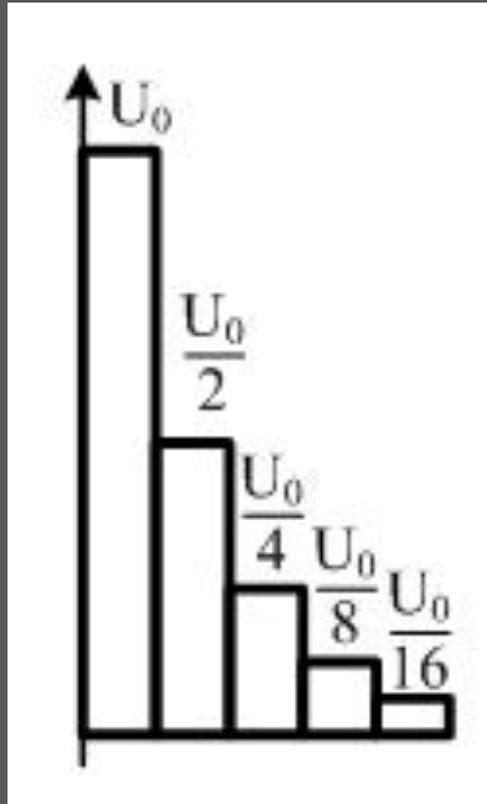


Для момента времени  $t_1$ :  $0 = U_{\text{нач}} + tg\alpha t_1 + F_{\text{нел}}(t_1)$

Для момента времени  $t_2$ :  $U_{\text{нач}} = U + tg\alpha t_{\text{нел}} + F(t_2)$

$$U_{\text{нел}} = tg\alpha (t_{\text{нел}} - t_1) + [F(t_2) - F(t_1)]$$

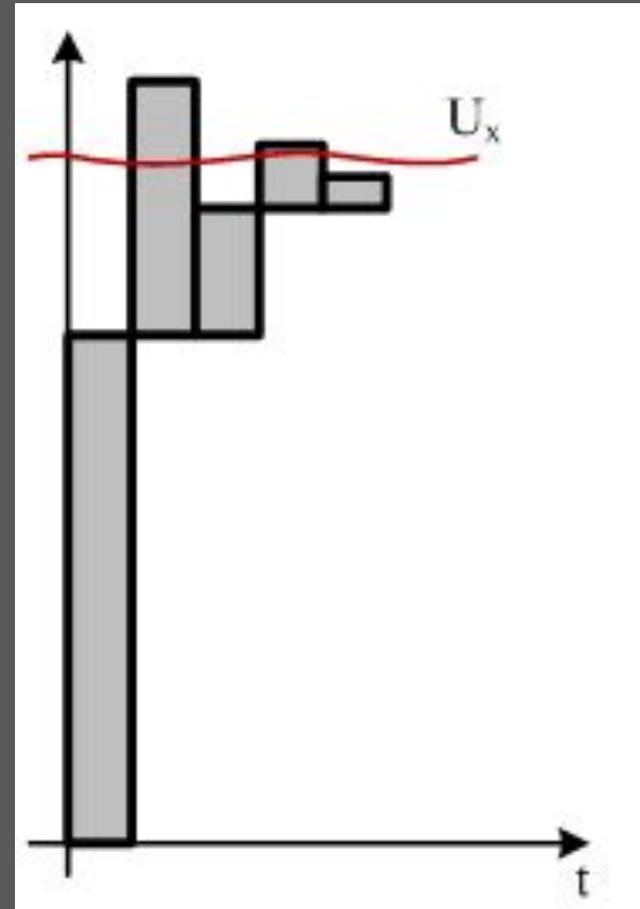
## 2. АЦП последовательного приближения



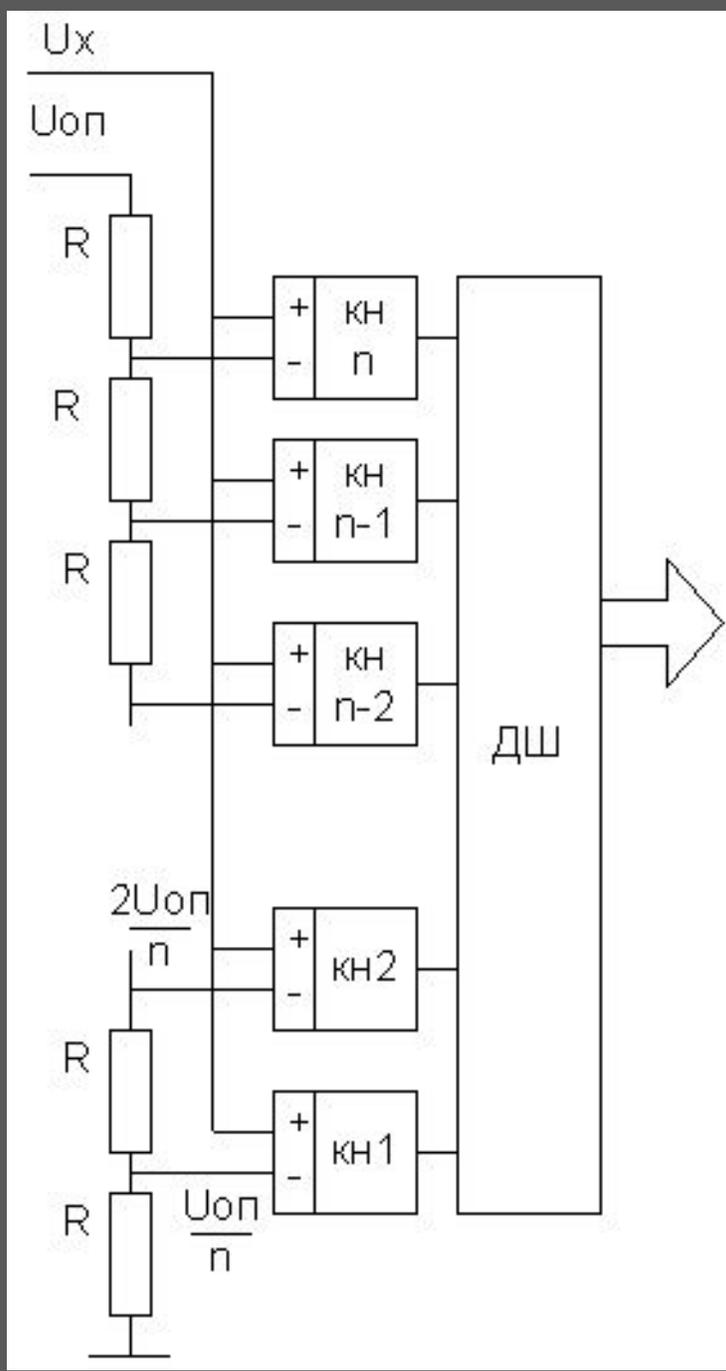
урных напряжений

$$U_{on i} = \frac{U_0}{2^i}$$

$$U_x = \sum_{i=0}^{n-1} a_{n-1-i} \frac{U_0}{2^i} = \sum_{i=0}^{n-1} a_{n-1-i} \frac{U_0}{2^i} \frac{2^{n-1}}{2^{n-1}} = \frac{U_0}{2^{n-1}} \sum_{i=0}^{n-1} a_{n-1-i} 2^{n-1-i} = \frac{U_0}{2^{n-1}} \sum_{i=0}^{n-1} a_i 2^i$$



### 3. АЦП параллельного считывания



$$N_{KH i} = \begin{cases} "0", U_x < \frac{iU_{оп}}{n} \\ "1", U_x > \frac{iU_{оп}}{n} \end{cases}$$