



Московский Авиационный  
(Национальный Исследовательский  
Институт  
Университет)

---

# *«Программно- Определяемые Радиосистемы»*

*Серкин Фёдор  
Борисович*

*Кафедра 408 –  
«Инфокоммуникации»*

---

## Литература:

1. Скляр Б., «Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение», «Вильямс», Москва, Санкт-Петербург, Киев, 2003.
2. Гольденберг Л.М., Матюшкин Б.Д., Поляк М.Н., «Цифровая обработка сигналов», «Радио и связь», Москва, 1990.
3. Максфилд К., «Проектирование на ПЛИС. Архитектура, средства и методы», «Додэка-XXI», Москва, 2007.
4. «IEEE 1012 Standard for Software Verification and Validation», IEEE, New York, 2005.
5. Tuttlebee W., «software defined radio. Enabling technology», WILEY, New York, 2002.

---

Содержание курса:

- I. Введение в ПОР.
- II. Основные теоретические вопросы проектирования ПОР.
- III. Реализация на жесткой и программируемой логике.
- IV. Программируемое радио.

## II. Основные теоретические вопросы проектирования ПОР.

---

Дискретизация.

$$T_s \leq \frac{1}{2f_m} \text{ с.}$$

- Теорема  
Котельникова.

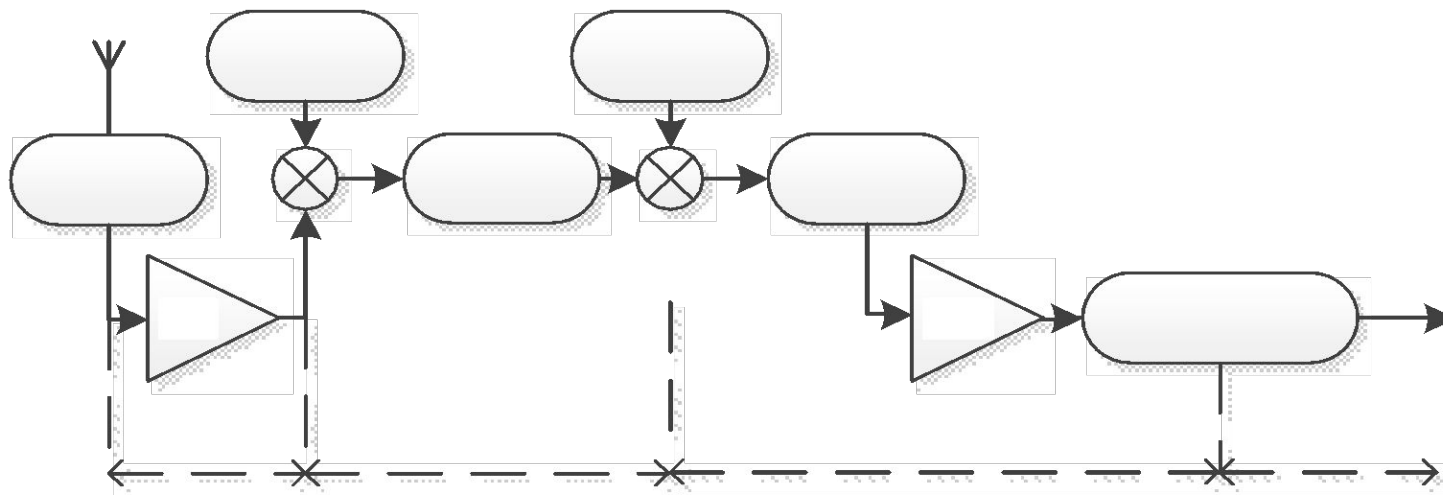
$$f_s \geq 2f_m.$$

- Критерий  
Найквиста.

## II. Основные теоретические вопросы проектирования ПОР.

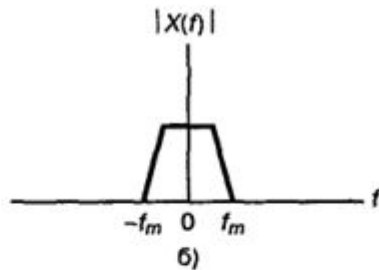
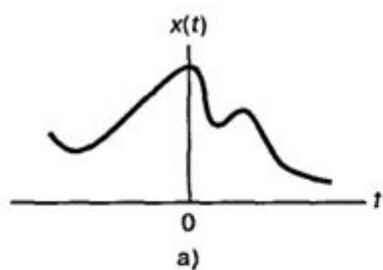
---

Пример схемы аналогового тракта.



## II. Основные теоретические вопросы проектирования ПОР.

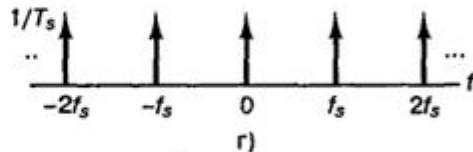
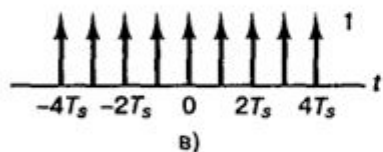
Выборка с использованием единичных импульсов.



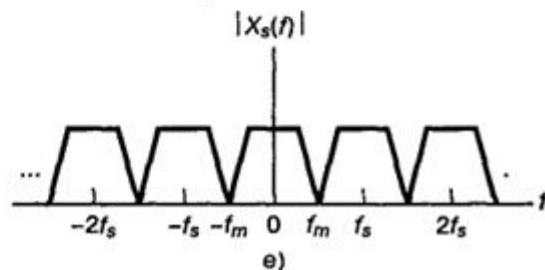
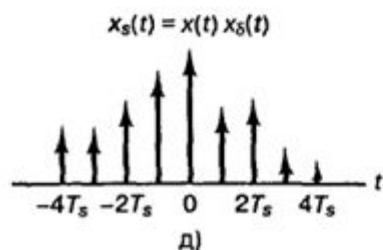
$$x_{\delta}(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT_s). \quad (1)$$

$$x(t)\delta(t - t_0) = x(t_0)\delta(t - t_0). \quad (2)$$

$$x_s(t) = x(t)x_{\delta}(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(t)\delta(t - nT_s) = \quad (3)$$



$$= \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(nT_s)\delta(t - nT_s).$$



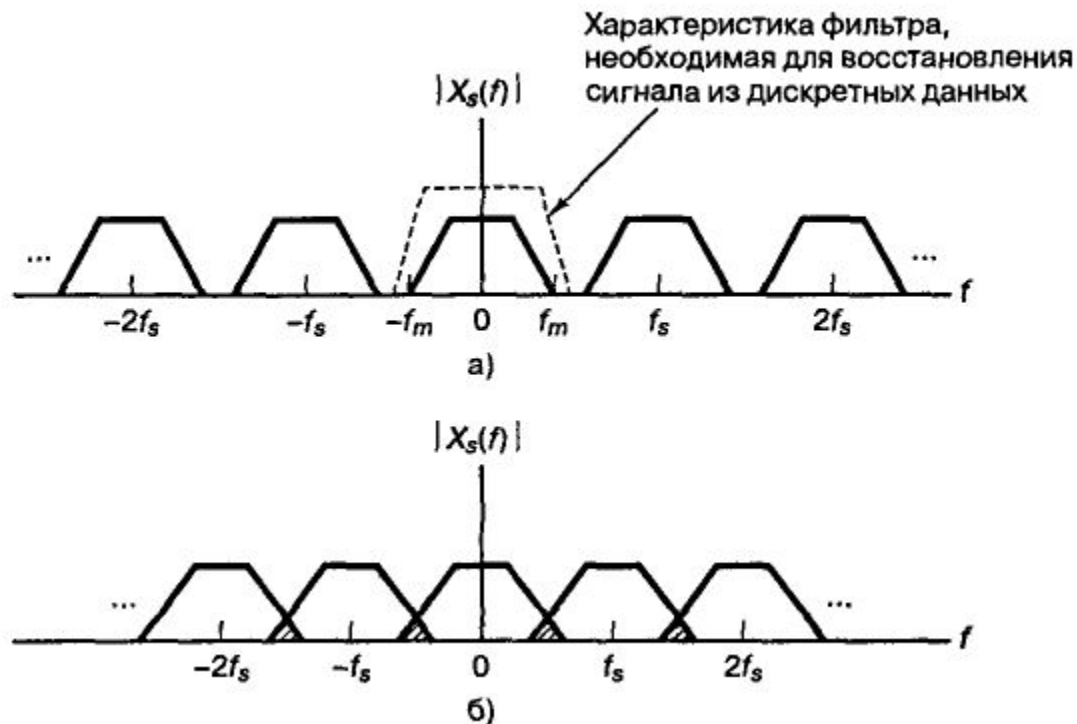
$$X_{\delta}(f) = \frac{1}{T_s} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(f - nf_s) \quad (4)$$

$$X(f) * \delta(f - nf_s) = X(f - nf_s). \quad (5)$$

$$X_s(f) = X(f) * X_{\delta}(f) = X(f) * \left[ \frac{1}{T_s} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(f - nf_s) \right] = \frac{1}{T_s} \sum_{n=-\infty}^{\infty} X(f - nf_s) \quad (6)$$

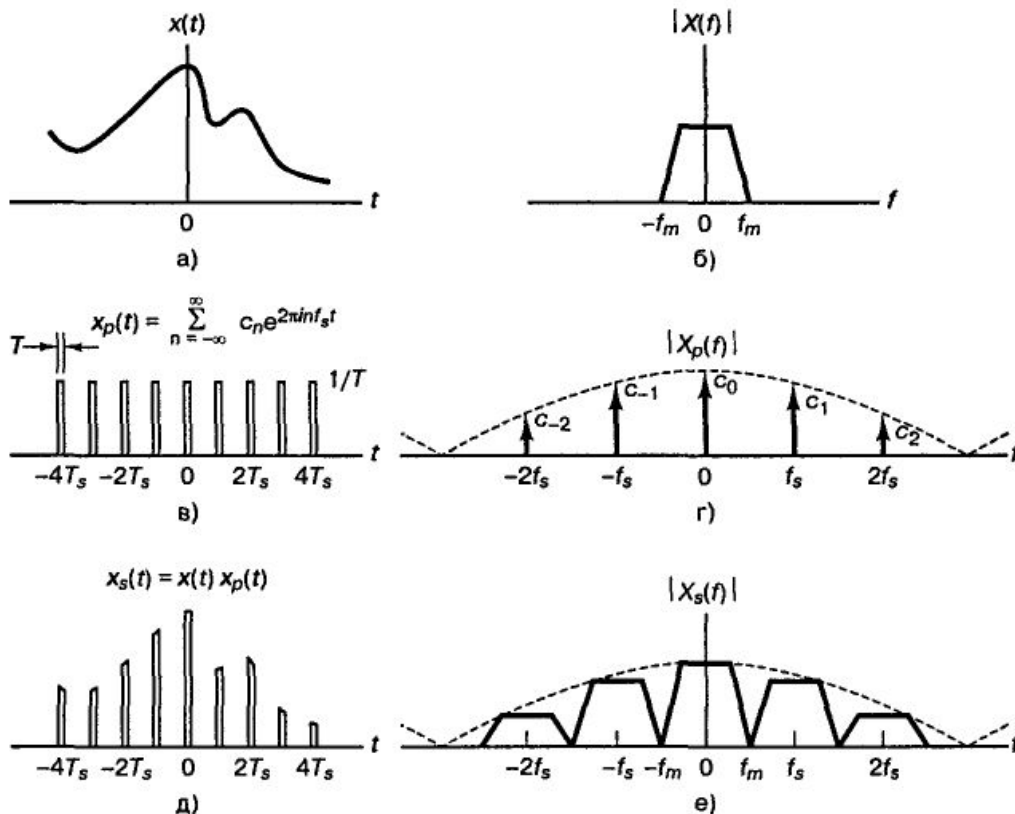
## II. Основные теоретические вопросы проектирования ПОР.

Выборка с использованием единичных импульсов.



## II. Основные теоретические вопросы проектирования ПОР.

Естественная дискретизация.



$$x_s(t) = x(t)x_p(t). \quad (1)$$

$$x_p(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{2\pi i n f_s t} \quad (2)$$

$$c_n = (1/T_s) \text{sinc}(nT/T_s) \quad \text{sinc } y = \frac{\sin \pi y}{\pi y}$$

$$x_s(t) = x(t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{2\pi i n f_s t} \quad (3)$$

$$X_s(f) = \mathfrak{F} \left\{ x(t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{2\pi i n f_s t} \right\} \quad (4)$$

$$X_s(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \mathfrak{F} \left\{ x(t) c_n e^{2\pi i n f_s t} \right\} \quad (5)$$

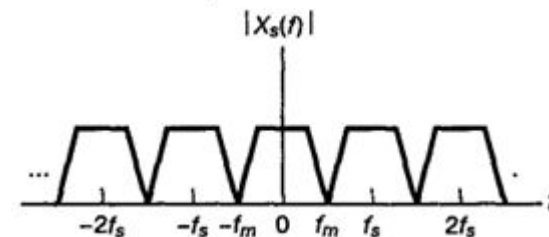
$$X_s(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n X(f - n f_s) \quad (6)$$



## II. Основные теоретические вопросы проектирования ПОР.

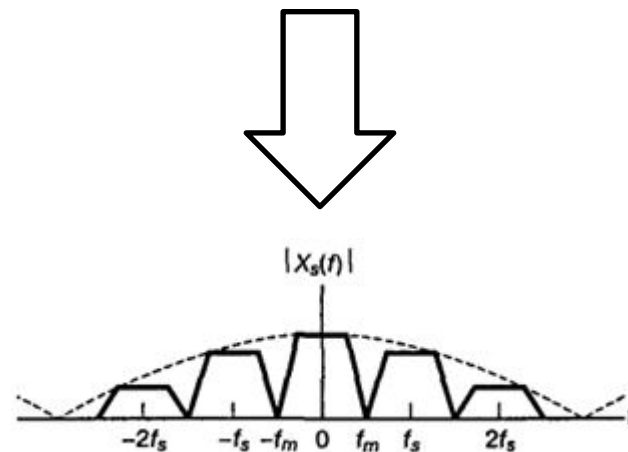
Метод «выборка-хранение».

$$\begin{aligned}
 x_s(t) &= p(t) * [x(t)x_\delta(t)] = \\
 &= p(t) * \left[ x(t) * \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT_s) \right]
 \end{aligned} \quad (1)$$



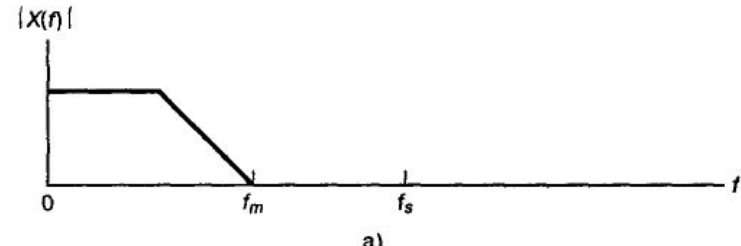
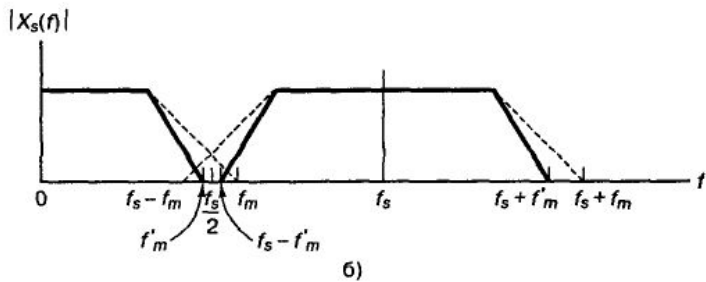
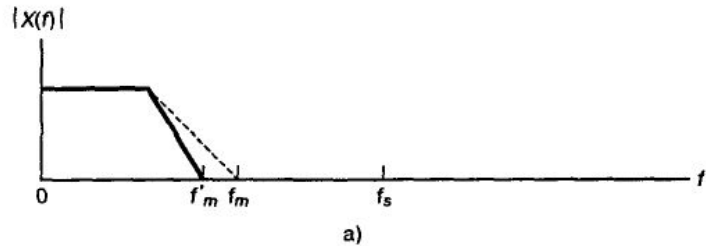
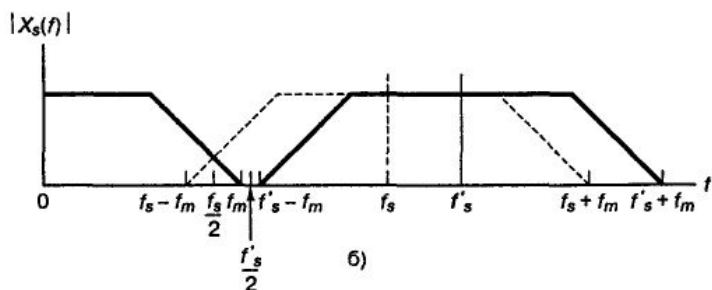
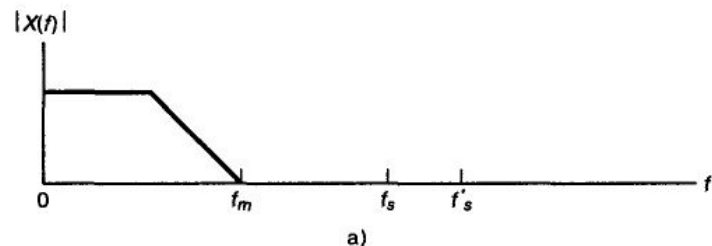
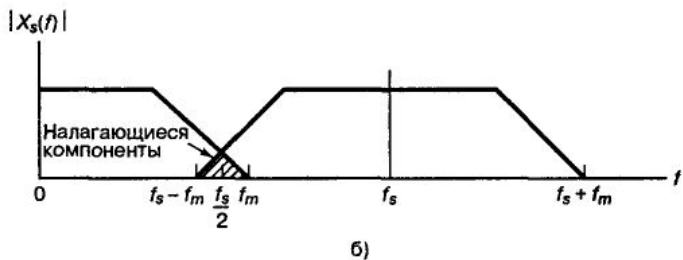
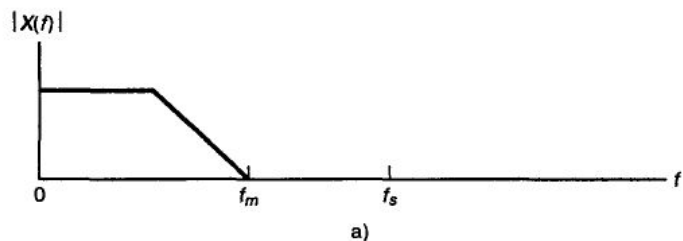
$$\begin{aligned}
 X_s(f) &= P(f) \mathfrak{F} \left\{ x(t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT_s) \right\} = \\
 &= P(f) \left\{ X(f) * \left[ \frac{1}{T_s} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(f - nf_s) \right] \right\} =
 \end{aligned} \quad (2)$$

$$= P(f) \frac{1}{T_s} \sum_{n=-\infty}^{\infty} X(f - nf_s).$$



# II. Основные теоретические вопросы проектирования ПОР.

## Наложение.



## II. Основные теоретические вопросы проектирования ПОР.

---

Зачем нужна выборка с запасом.

### **выборка без запаса:**

1. Сигнал пропускается через высокопроизводительный аналоговый фильтр нижних частот для ограничения его полосы
2. Отфильтрованный сигнал дискретизируется с частотой Найквиста с целью создания сигнала с приблизительно ограниченной полосой. Сигнал со строго ограниченной полосой нереализуем.
3. Выборки квантуются устройством преобразования аналоговых сигналов в цифровые, отображающим выборки, которые могут принимать значения из непрерывного диапазона, в конечный набор дискретных уровней.

## II. Основные теоретические вопросы проектирования ПОР.

---

Зачем нужна выборка с запасом.

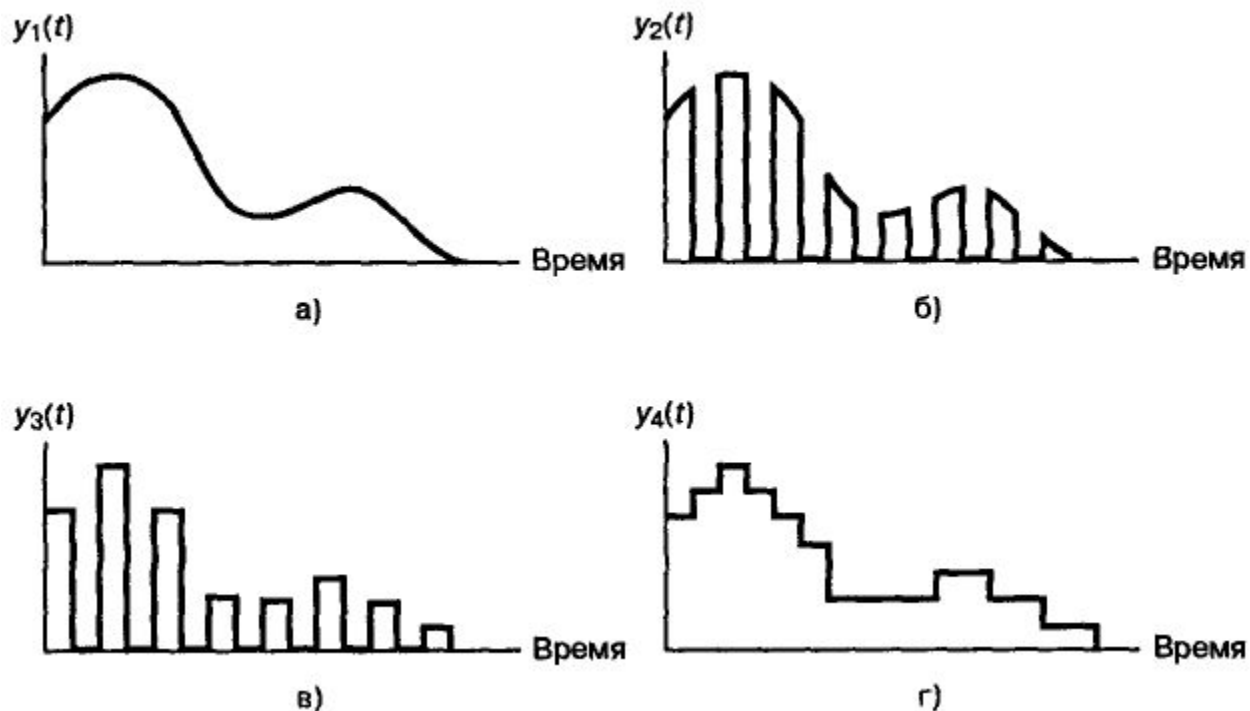
### **выборка с запасом:**

1. Сигнал пропускается через менее производительный аналоговый фильтр нижних частот для ограничения его полосы
2. Отфильтрованный сигнал дискретизируется с частотой выше частоты Найквиста с целью создания сигнала с приблизительно ограниченной полосой.
3. Выборки квантуются устройством преобразования аналоговых сигналов в цифровые, отображающим выборки, которые могут принимать значения из непрерывного диапазона, в конечный набор дискретных уровней.
4. Цифровые выборки обрабатываются высокопроизводительным цифровым фильтром для сужения полосы цифровых выборок.
5. Частота дискретизации на выходе цифрового фильтра уменьшается пропорционально сужению полосы.

## II. Основные теоретические вопросы проектирования ПОР.

---

Процесс дискретизации и квантования.



## II. Основные теоретические вопросы проектирования ПОР.

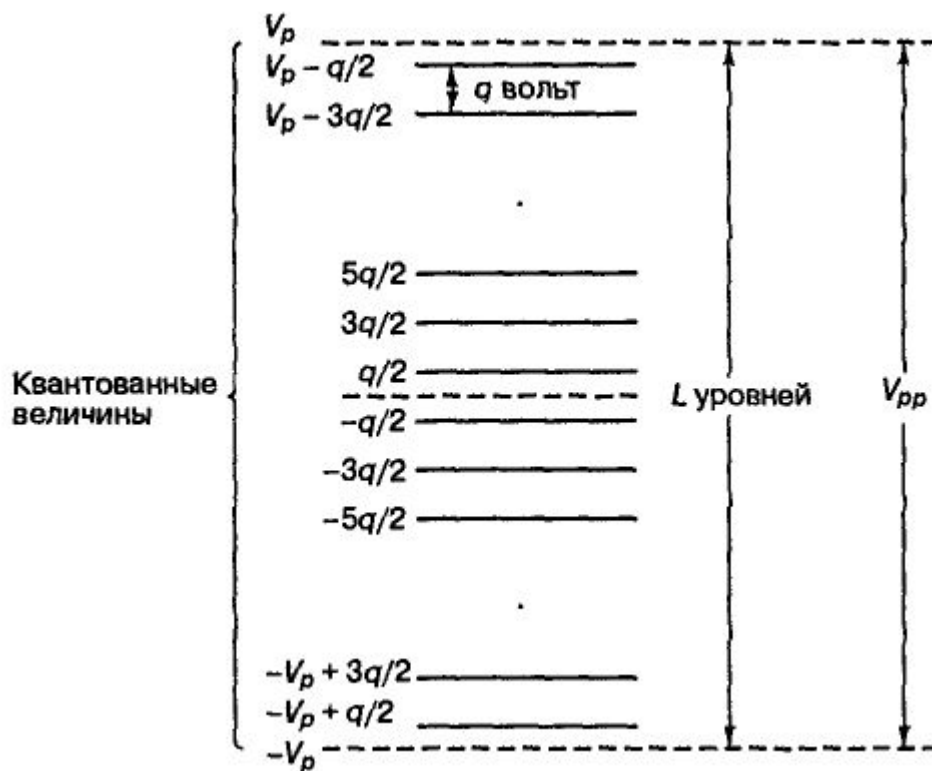
---

Влияние дискретизации и квантования.

1. Ошибка округления на уровнях квантования
2. Насыщение (переполнение).
3. Смещение положения выборки.

## II. Основные теоретические вопросы проектирования ПОР.

Отношение сигнал/шум для квантованных импульсов.



$$\sigma^2 = \int_{-q/2}^{+q/2} e^2 p(e) de = \quad (1)$$

$$= \int_{-q/2}^{+q/2} e^2 \frac{1}{q} de = \frac{q^2}{12}$$

$$V_p^2 = \left( \frac{V_{pp}}{2} \right)^2 = \left( \frac{q(L-1)}{2} \right)^2 = \frac{L^2 q^2}{4} \quad (2)$$

$$\left( \frac{S}{N} \right)_q = \frac{L^2 q^2 / 4}{q^2 / 12} = 3L^2 \quad (3)$$

## II. Основные теоретические вопросы проектирования ПОР.

---

Воздействие канала.

1. Шум канала: тепловой шум, помехи пользователей и «железа»
2. Межсимвольная интерференция
3. Смещение положения выборки.

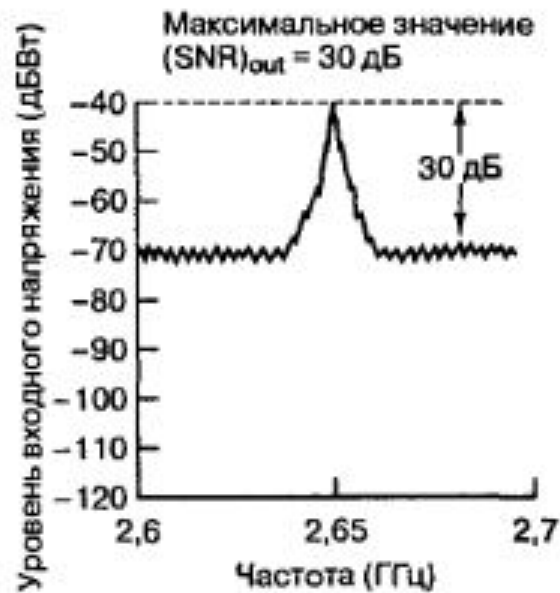
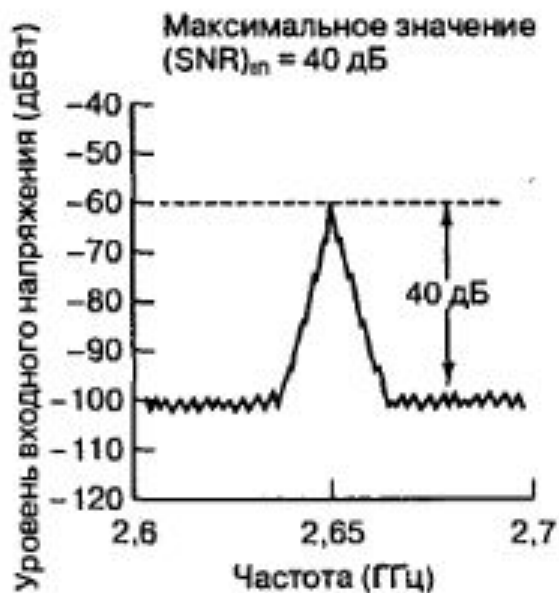


## II. Основные теоретические вопросы проектирования ПОР.

Коэффициент шума.

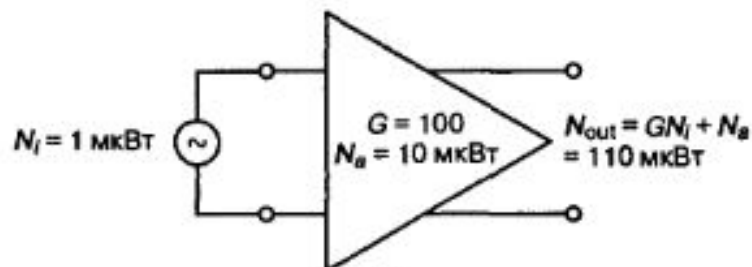
$$F = \frac{(\text{SNR})_{\text{in}}}{(\text{SNR})_{\text{out}}} = \frac{S_i / N_i}{G S_i / G (N_i + N_{oi})}$$

$S_i$  — мощность сигнала во входном порту усилителя  
 $N_i$  — мощность шума во входном порту усилителя  
 $N_{oi}$  — шум усилителя относительно входного порта  
 $G$  — коэффициент усиления усилителя



## II. Основные теоретические вопросы проектирования ПОР.

Коэффициент шума.



а)



б)

$$F = \frac{N_i + N_{ai}}{N_i} = 1 + \frac{N_{ai}}{N_i} \quad (1)$$

$$N_0 = \kappa T_0^{\circ} = 1,38 \times 10^{-23} \times 290 = 4,00 \times 10^{-21} \text{ Вт/Гц}$$

## II. Основные теоретические вопросы проектирования ПОР.

---

Шумовая температура.

$$N_{at} = (F - 1)N_r \quad N = \kappa T^\circ W \text{ Ватт.} \quad (1)$$

$$\kappa T_R^\circ W = (F - 1)\kappa T_0^\circ W$$

$$T_R^\circ = (F - 1) T_0^\circ.$$

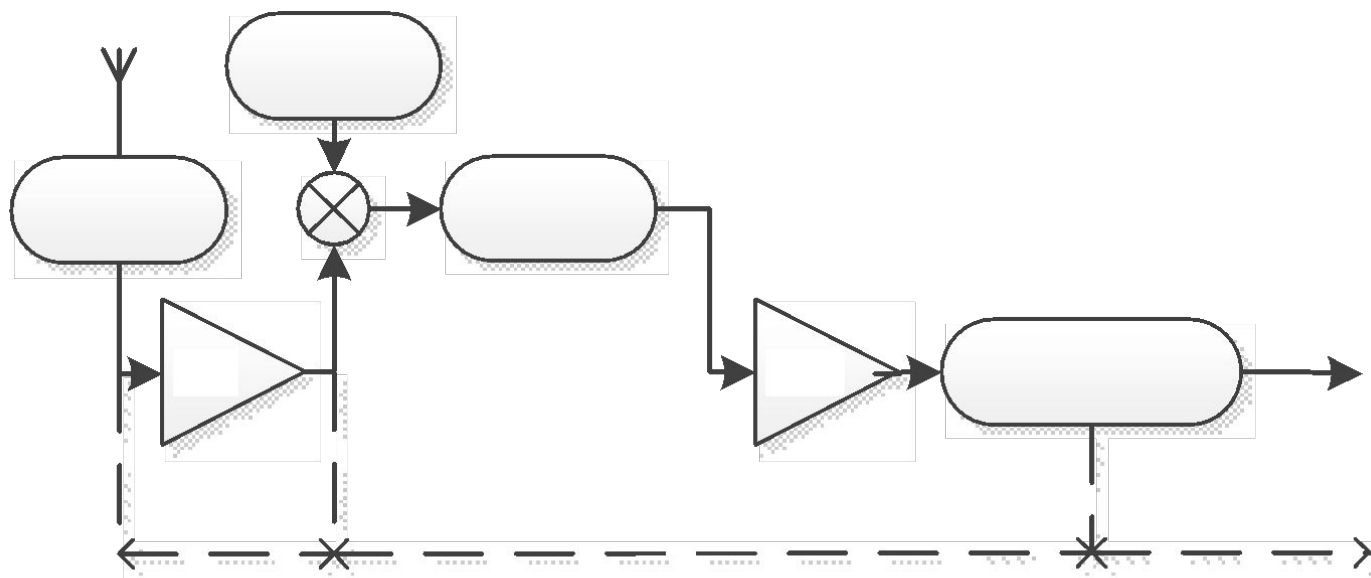
$$T_R^\circ = (F - 1) 290 \text{ К.} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} N_{out} &= GN_i + Gn_{at} = \\ &= G\kappa T_g^\circ W + G\kappa T_R^\circ W = G\kappa(T_g^\circ + T_R^\circ)W = \\ &= G\kappa T_g^\circ W + (F - 1)G\kappa T_0^\circ W, \end{aligned} \quad (3)$$

## II. Основные теоретические вопросы проектирования ПОР.

---

Пример схемы аналогового тракта с прямым переносом.





Московский Авиационный  
(Национальный Исследовательский  
Институт  
Университет)

---

**Спасибо за внимание.**