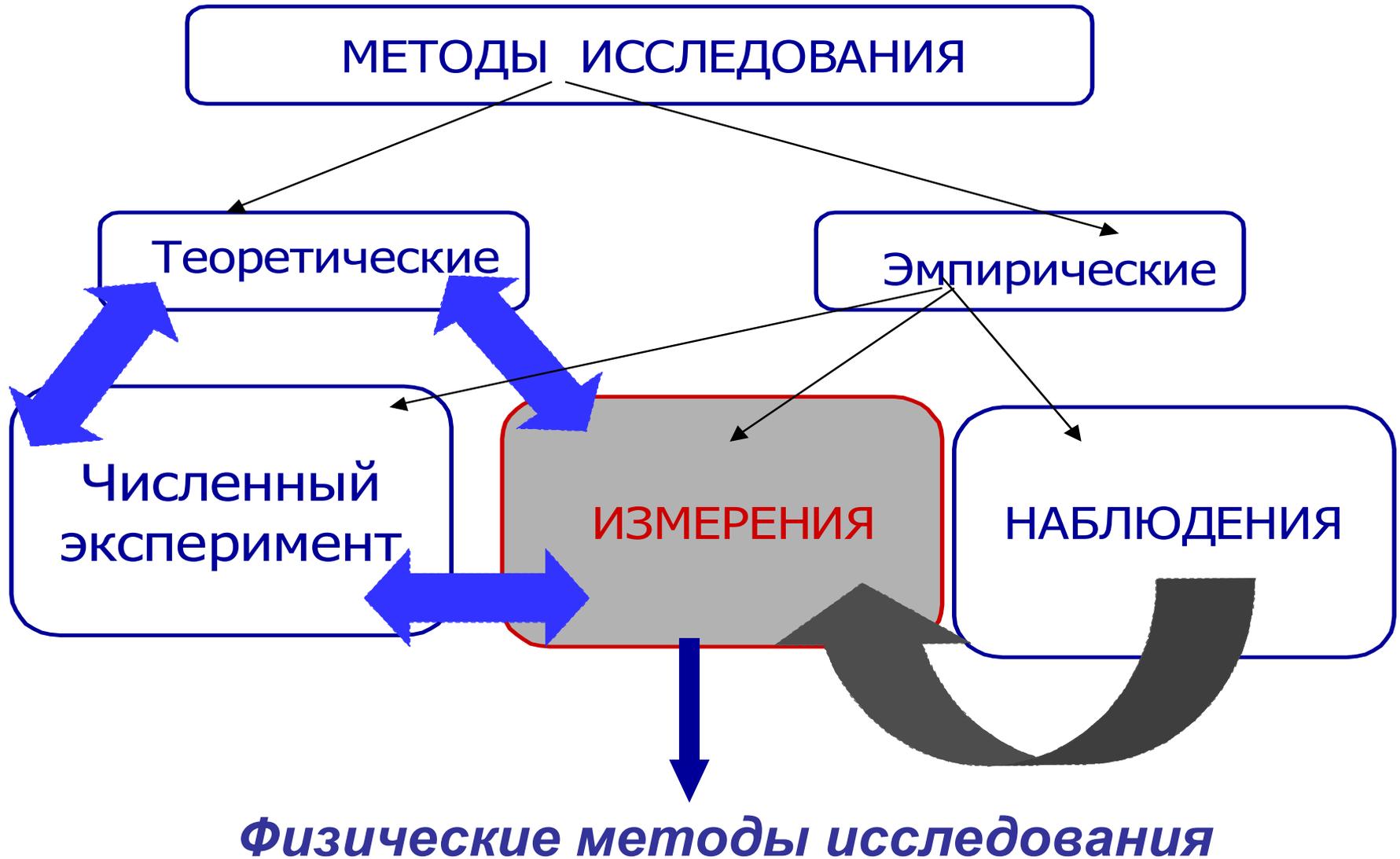




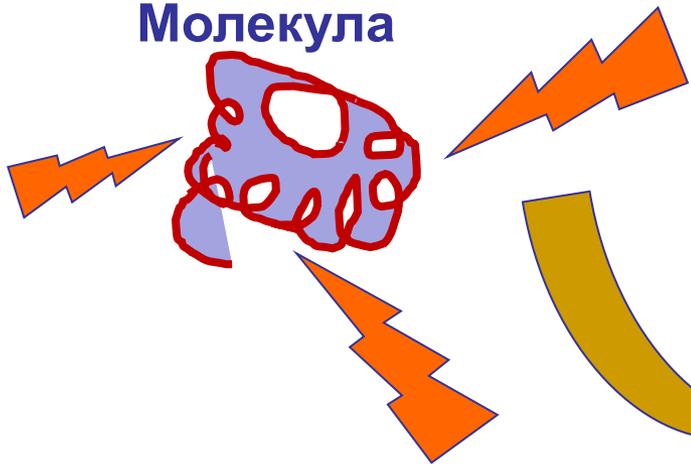
*Наука начинается с тех пор, как начинают измерять.
Д. И. Менделеев*





Физические методы исследования

Молекула



Свойства

- радиоспектроскопия (ЯМР, ЭПР)
- оптическая спектроскопия
- масс-спектрометрия
- методы фракционирования
-

Процесс

Механизм

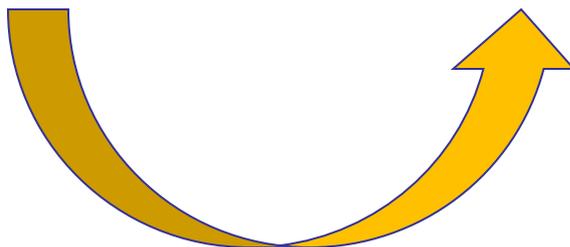
A+B



C



D





Измерение – сравнение с эталоном

- Прямое
- Косвенное

- Децентрализация
- Фундаментальные
КОНСТАНТЫ

$$1 \text{ m} = c / 299\,792\,458 \text{ s}$$

**Точная наука
немыслима без
меры.**

Д. И. Менделеев

$$L_{pl} = \sqrt{\frac{G \hbar}{c^3}} = 1.6 \cdot 10^{-33} \text{ см}$$

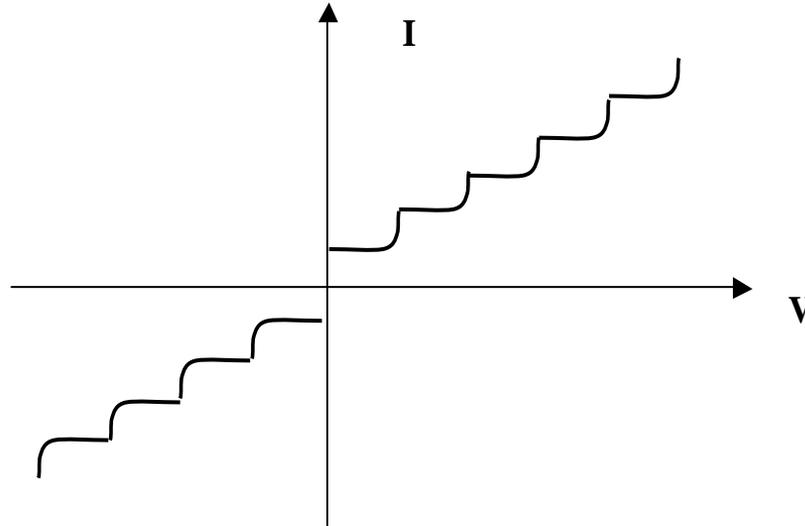
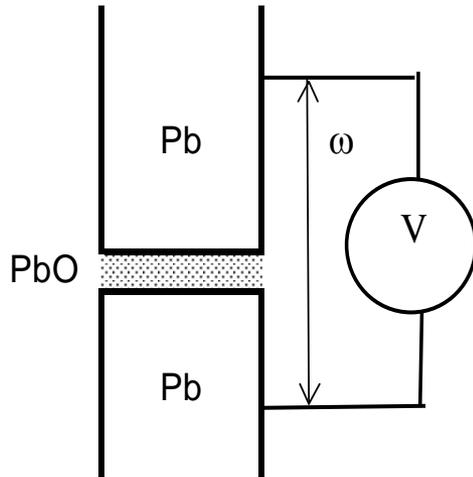
$$m_{pl} = \sqrt{\frac{c \hbar}{G}} = 2.2 \cdot 10^{-5} \text{ г}$$

$$t_{pl} = \frac{L_{pl}}{c} = 0.5 \cdot 10^{-43} \text{ с}$$



Квантовая метрология

Эталон Вольты



$$n\hbar\omega = 2eV; \quad V = n\left(\frac{\hbar\omega}{2e}\right)$$

$$\frac{2e}{\hbar} = 4.83 \cdot 10^{14} \text{ Гц} / \text{В}$$

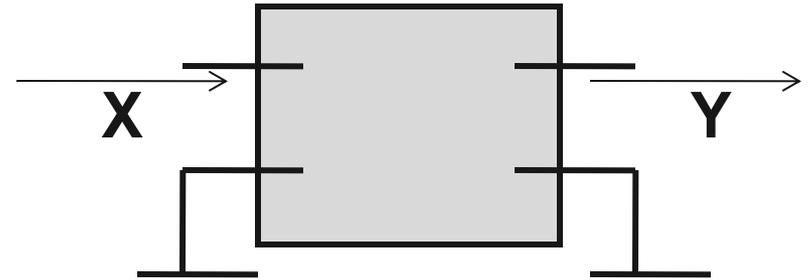
Вольт	$2 \cdot 10^{-9}$
Секунда	$\sim 10^{-14}$
Килограмм	$2 \cdot 10^{-6}$



Характеристики измерений

Динамический диапазон

$$D = \frac{X_{\max}}{X_{\min}} \rightarrow \frac{X_{\max}}{\delta X}$$



Чувствительность

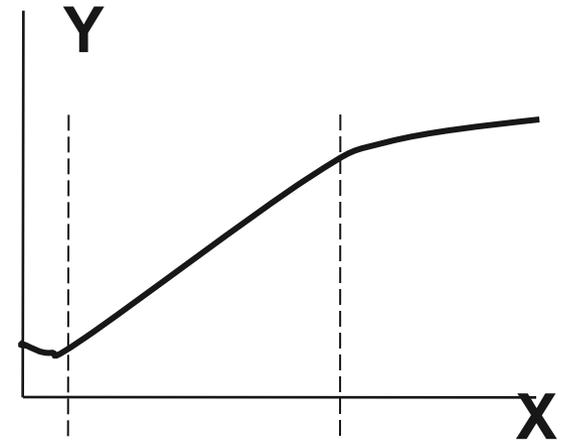
$$S = \frac{Y}{X} \quad S_{dif} = \frac{dY}{\delta X}$$

Разрешающая способность

$$R = \frac{X}{\delta X}$$

Отношение сигнал/шум

$$\frac{S}{N} = \frac{Y^2}{\delta Y^2}$$



Пространственное разрешение

$$\delta X = \frac{1}{S} \int_S X(S) dS = \frac{1}{V} \int_V X(V) dV = \frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} X(\Omega) d\Omega$$

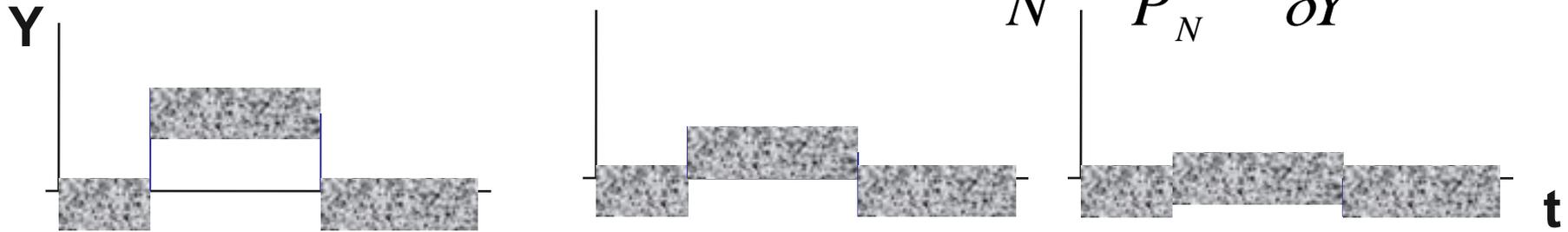
$$\delta X = \frac{1}{\tau} \int_{\tau} X(t) dt$$

δX – порог обнаружения – время измерения

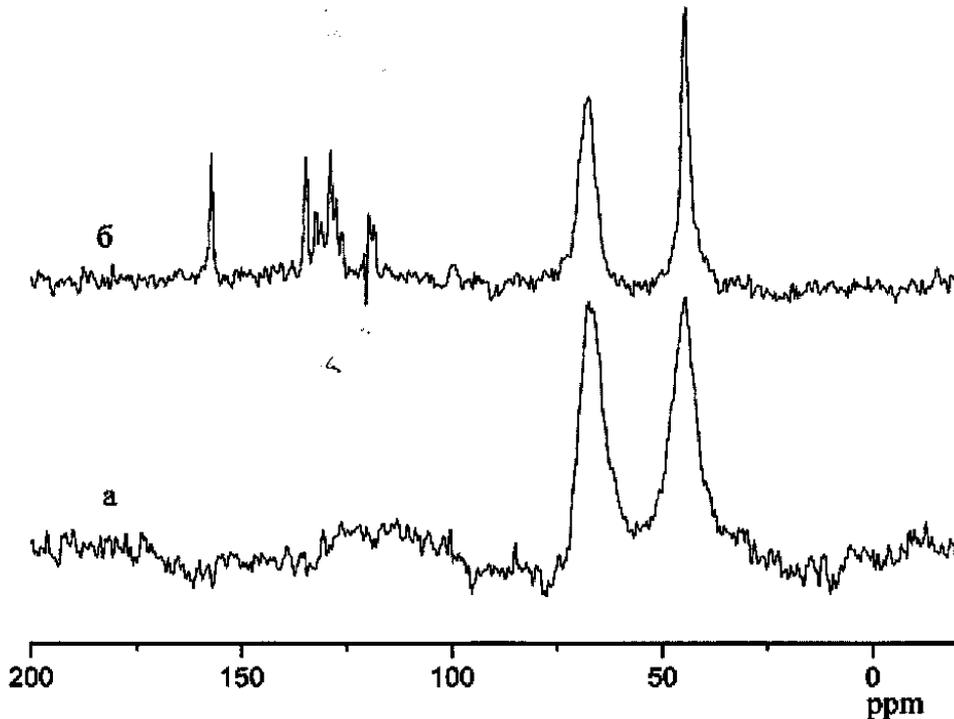


Характеристики измерений

Отношение сигнал/шум



$$\frac{S}{N} = \frac{P_S}{P_N} = \frac{Y^2}{\delta Y^2}$$



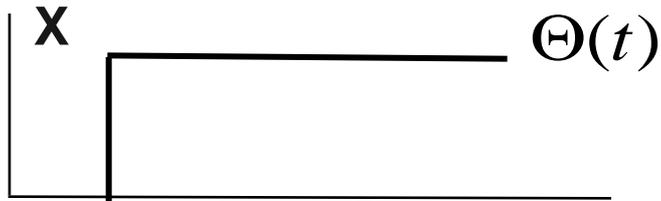
$$I(\text{Бел}) = \lg\left(\frac{P_2}{P_1}\right)$$

$$I(\text{дБ}) = 10 \cdot \lg\left(\frac{P_2}{P_1}\right) =$$

$$= 10 \cdot \lg\left(\frac{V_2^2}{V_1^2}\right) = 20 \lg\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$



Временные характеристики измерений



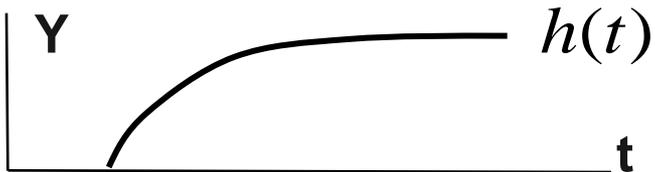
Входной сигнал

Отклик

$$\sin \omega t$$

$$K(\omega) = \frac{\hat{Y}}{\hat{X}} \Big|_{\omega} = A(\omega)e^{i\varphi(\omega)}$$

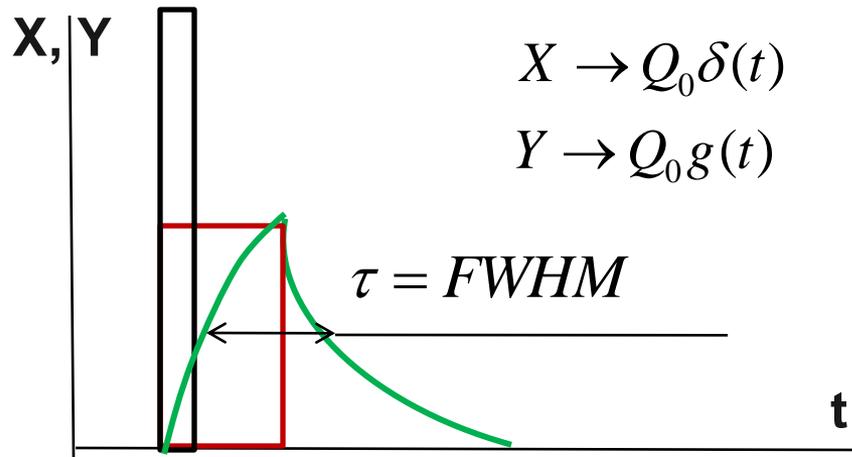
Коэффициент передачи



$$\Theta(t)$$

$$h(t)$$

Переходная характеристика



$$X \rightarrow Q_0 \delta(t)$$

$$Y \rightarrow Q_0 g(t)$$

$$\delta(t)$$

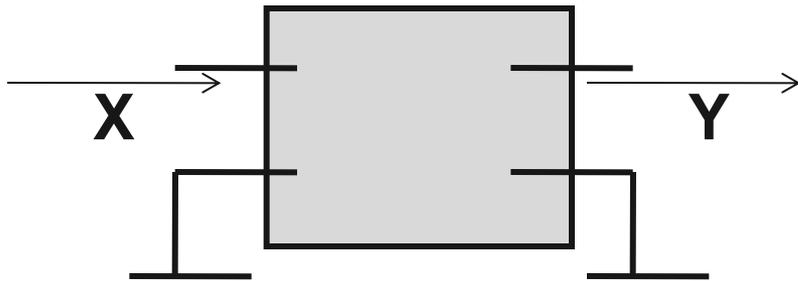
$$g(t)$$

Импульсная реакция
Аппаратная функция

$$\delta(t) = \frac{d}{dt} \Theta(t) \quad g(t) = \frac{d}{dt} h(t)$$



Характеристики измерителя



Время

$$U_1 = RI + U_2$$

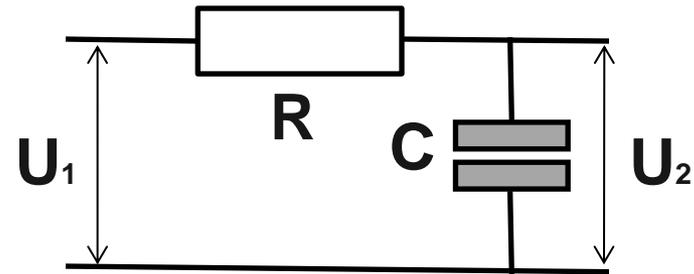
$$q = CU$$

$$\dot{q}_C = C\dot{U}_2$$

$$U_1 = RC\dot{U}_2 + U_2$$

$$U_2 - U_1 = -RC \frac{dU_2}{dt}$$

$$U_2 = U_1(1 - e^{-t/RC})$$



Частота

$$K(\omega) = \frac{U_2}{U_1} |_{\omega} = A(\omega)e^{i\varphi(\omega)}$$

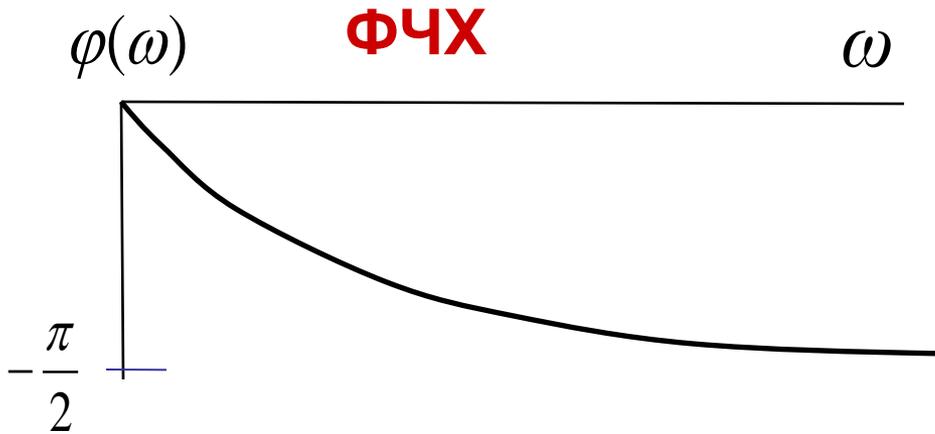
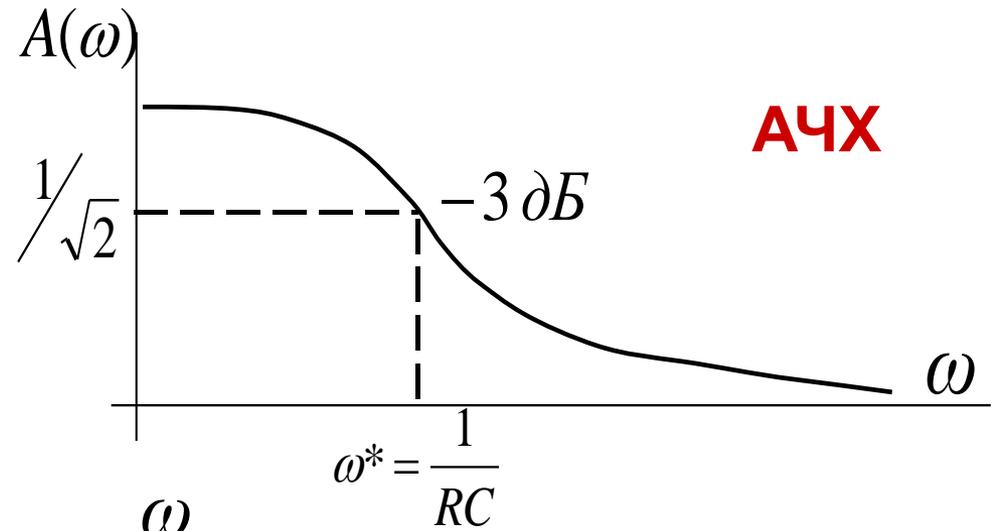
$$U_2 = U_1 \frac{Z_C}{Z_R + Z_C}$$

$$K(\omega) = \frac{U_2}{U_1} = \frac{Z_C}{Z_R + Z_C} = \frac{1}{1 + \frac{Z_R}{Z_C}} = \frac{1}{1 + i\omega RC}$$

$$A(\omega) = |K(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}$$



Характеристики измерителя



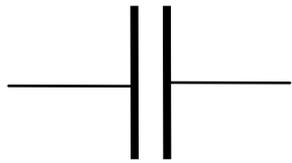


Аналогия: электричество - механика



U

F



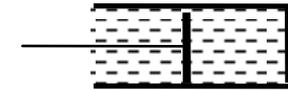
$$\frac{q}{C}$$

$$kx$$



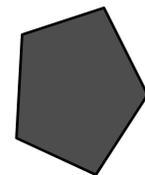
$$IR = R \frac{dq}{dt}$$

$$\eta \frac{dx}{dt}$$



$$L \dot{I} = L \frac{d^2 q}{dt^2}$$

$$m \frac{d^2 x}{dt^2}$$





Не только механика

Электричество

$$j_q = -\sigma \cdot \nabla U$$

Механика

$$j_x = -\mu \cdot \nabla E$$

Поток \sim grad

Диффузия

$$j_d = -D \cdot \nabla n$$

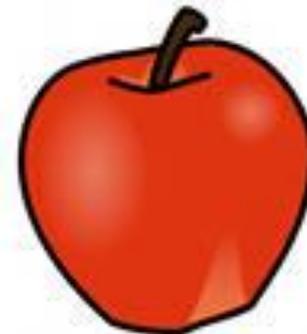
Линейные
СИСТЕМЫ

Теплопроводность

$$j_Q = -\chi \cdot \nabla T$$

Вязкость

$$j_p = -\eta \frac{du_x}{dz}$$



1



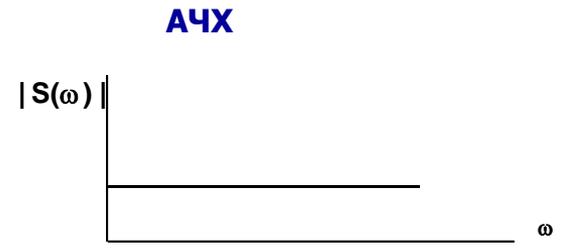
АЧХ и функция отклика

Динам.
уравнение

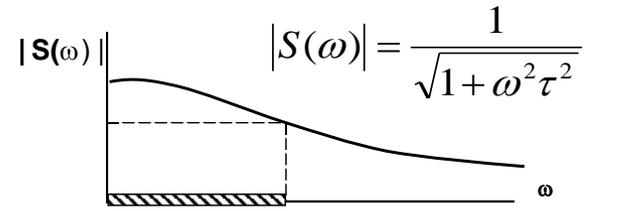
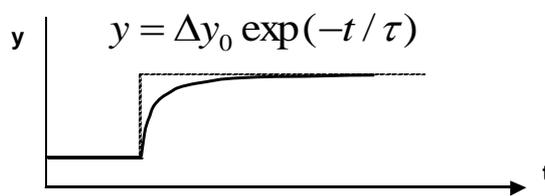
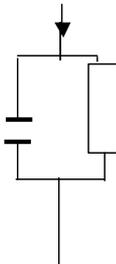
$$y = Sx$$

$$x = I$$

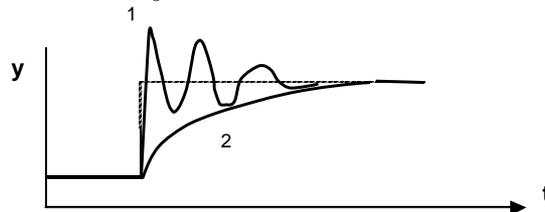
$$y = U$$



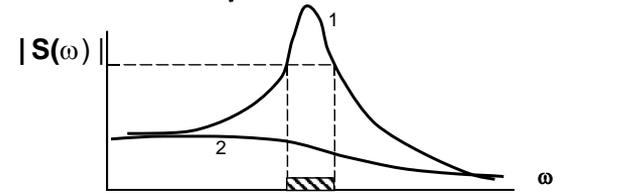
$$y = \tau \cdot \dot{x} + x$$



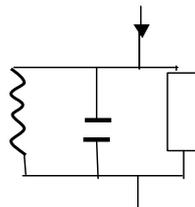
$$y = \Delta y_0 \exp(-t/\tau) \sin \omega t$$



$$|S(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{(\omega L/R)^2 + (1 - \omega^2 LC)^2}}$$



$$y = a\ddot{x} + b\dot{x} + x$$





Преобразование Фурье



Jean Baptiste Joseph Fourier
1768 - 1830

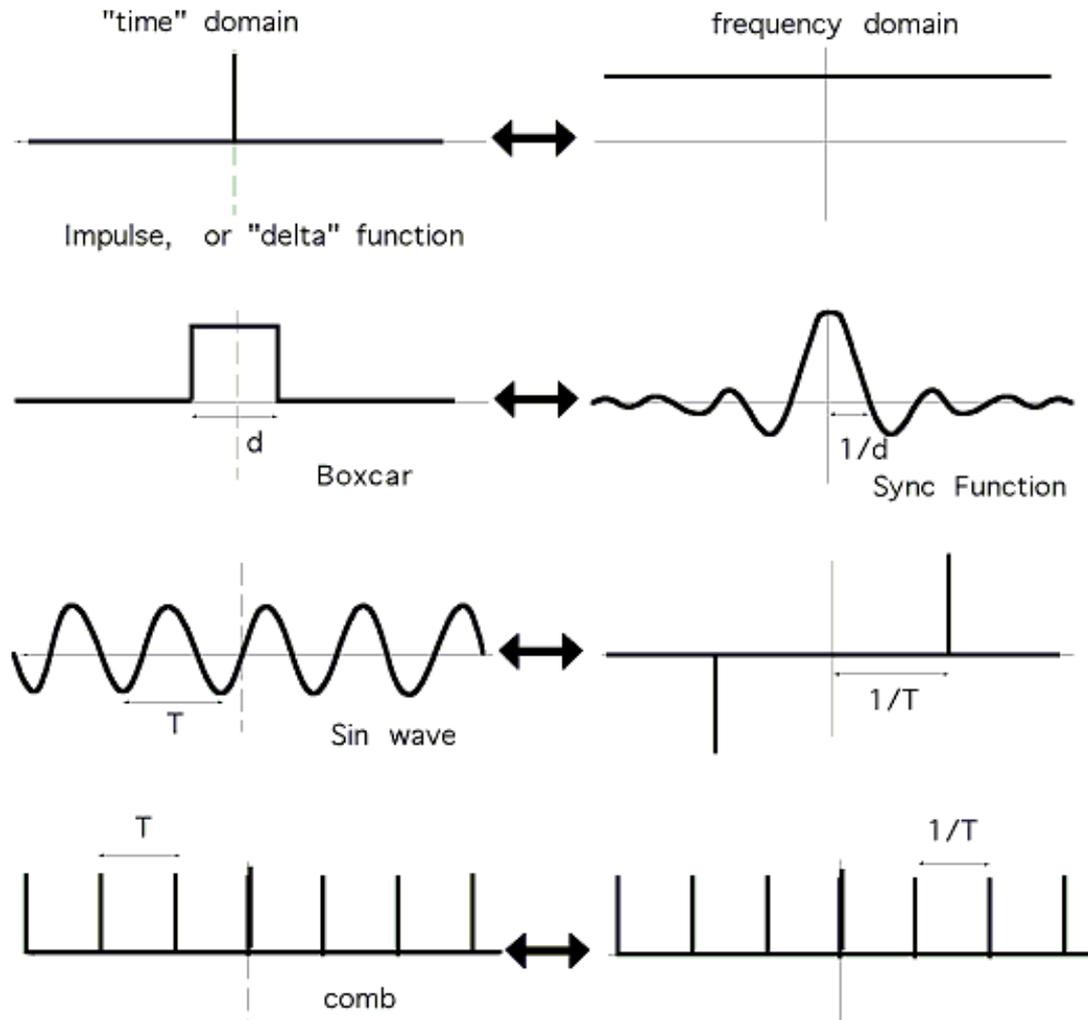
$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega$$

$$\Delta\omega \cdot \Delta t \sim 1$$

Периодическая функция -
линейчатый спектр

Апериодическая функция -
непрерывный спектр





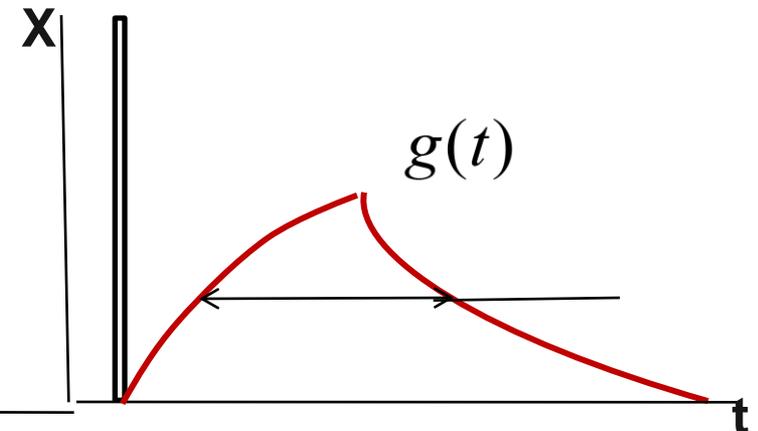
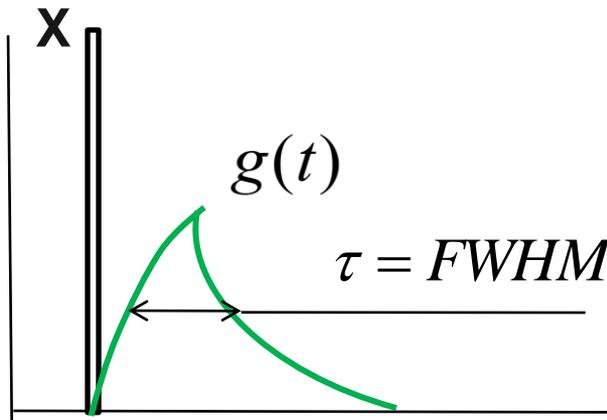
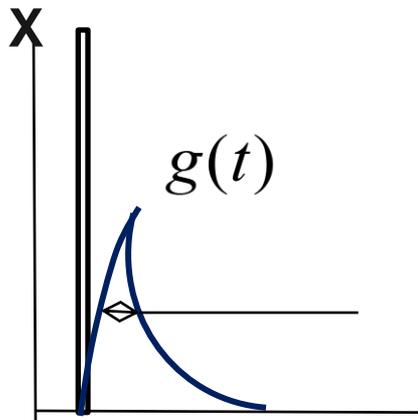
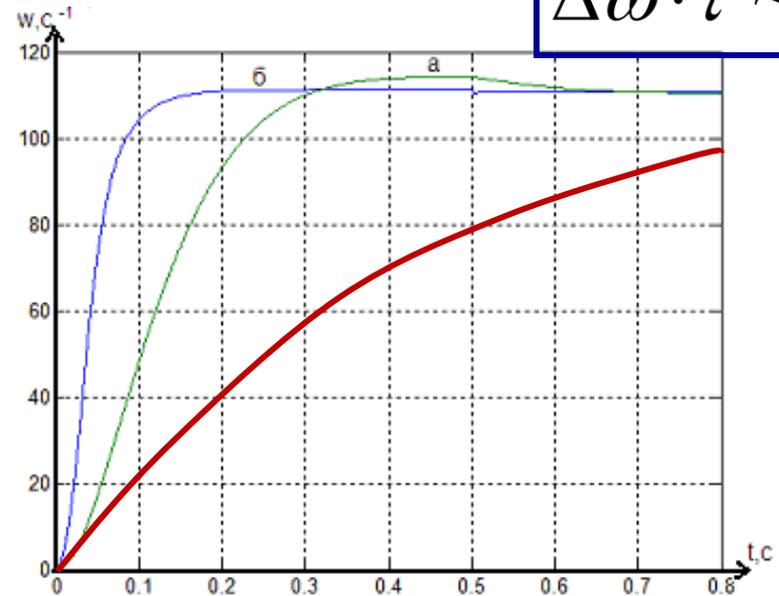
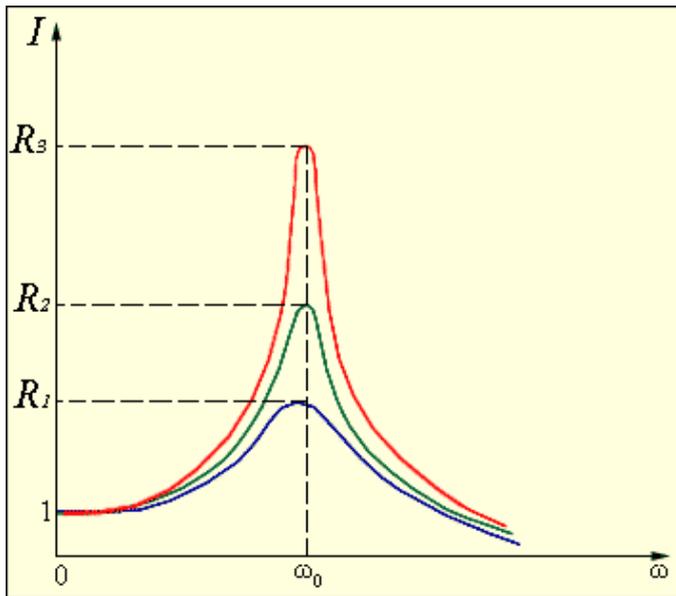
Получение спектра





Широко- и узко-полосные системы

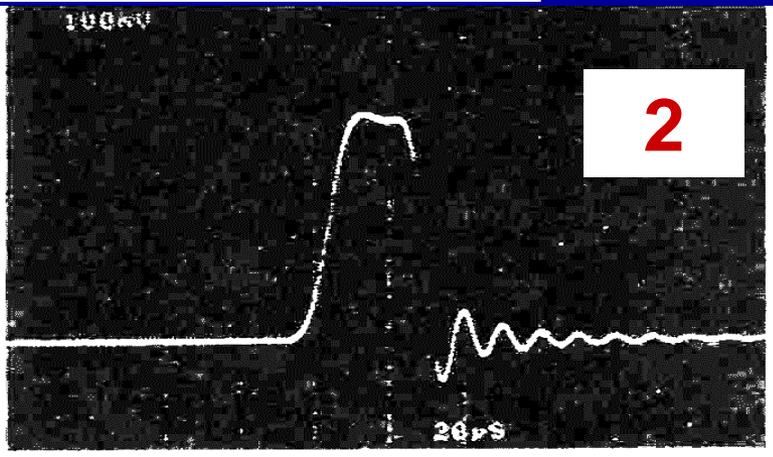
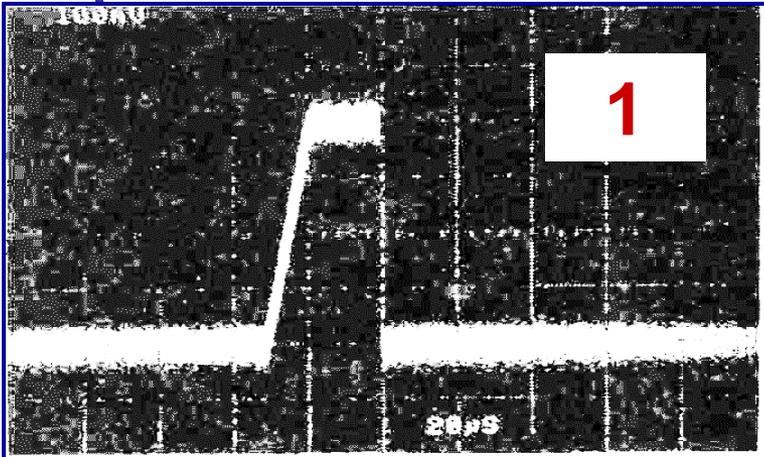
$$\Delta\omega \cdot \tau \sim 1$$



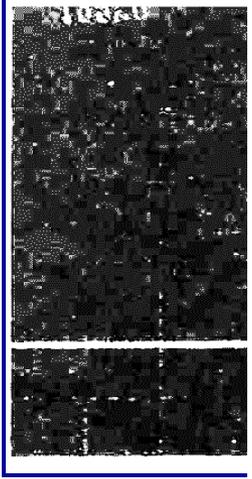


Полоса пропускания, время отклика, уровень шума

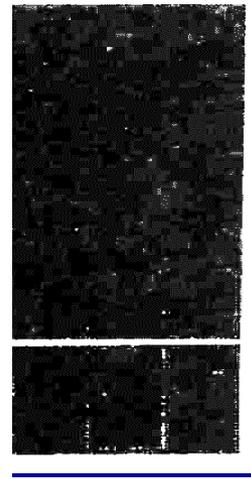
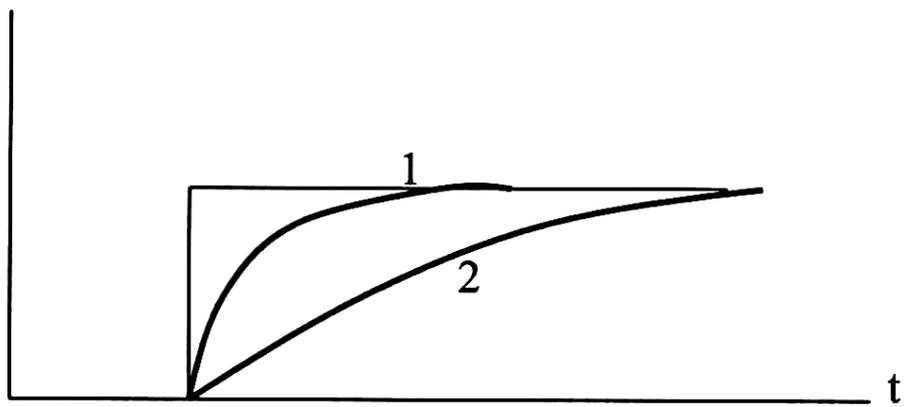
$$\Delta\omega \cdot \Delta t \sim 1$$



(a)



x, y



1 - широкополосная система

2 - узкополосная система



Паразитные сигналы (погрешности измерений)

СЛУЧАЙНЫЕ

СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ

- Можно оценить
и внести поправки

ШУМЫ

ПОМЕХИ
- Космические
- Атмосферные
- Промышленные

- Можно устранить
организационными
или техническими
мерами

НЕРАВНОВЕСНЫЕ
- дробовой
- генерационно-рекомбинационный
- импульсный
- фликкер (1/f)
- оцифровка данных
-
-

РАВНОВЕСНЫЕ
- Найквиста
- Броуновское движение

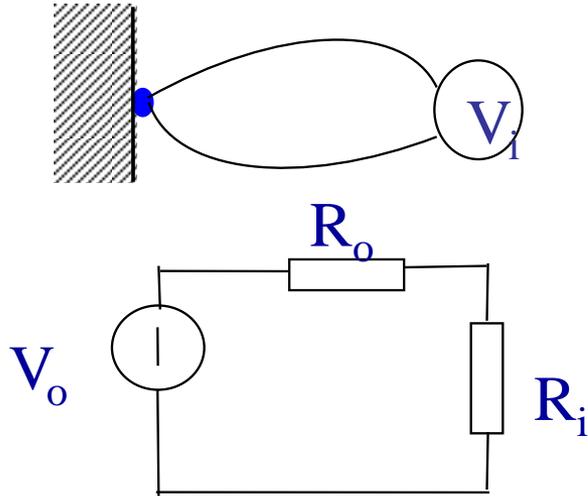
- Жестко связаны
с полосой пропускания
измерительного устройства



Систематическая погрешность

Влияние процесса измерения на систему

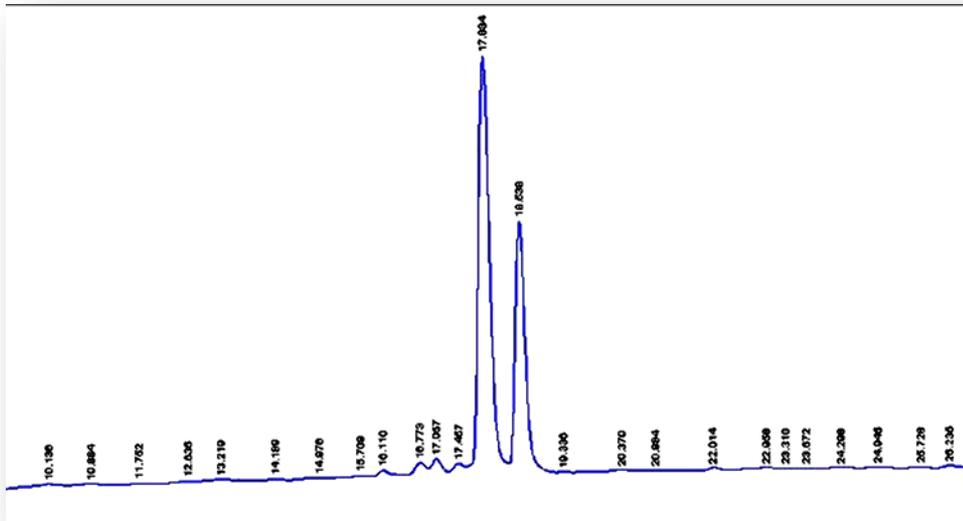
- препаративные процедуры ("soft matter")
- нестабильность во времени
- неоднородность в пространстве
-



$$V_i = V_0 \frac{R_i}{R_0 + R_i}$$

3-н Нернста для растворов

$$\Delta\varphi_{21} = \frac{kT}{ze} \ln \frac{C_2}{C_1}$$

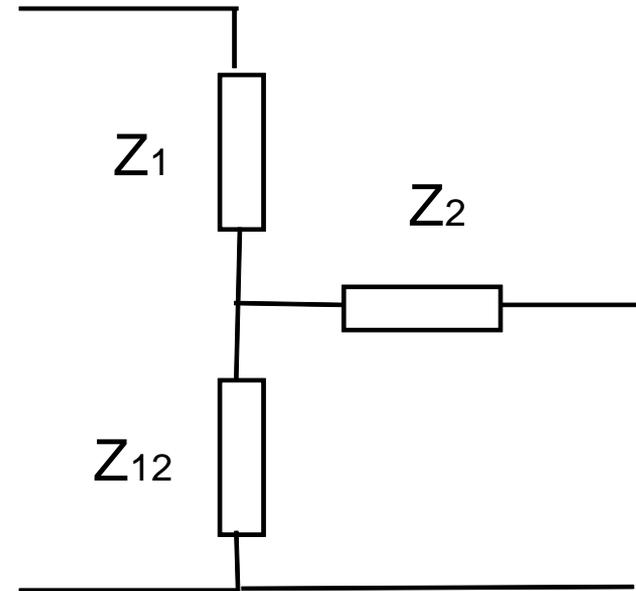




Помехи –

- связанные контуры

$$k_{21} = \frac{P_{21}}{P_1}$$



Резистивный $Z_{12} \equiv R$

Емкостной $Z_{12} \equiv \frac{1}{j\omega C}$

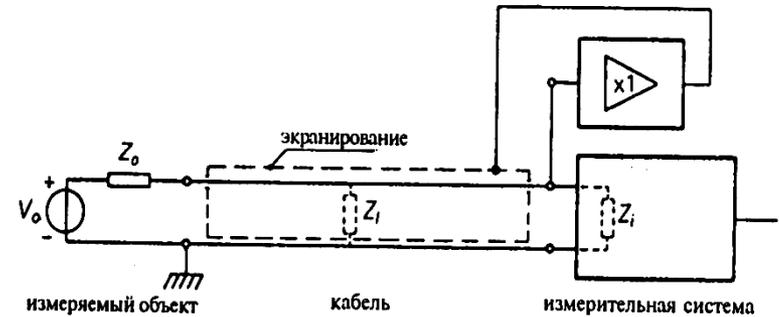
Индуктивный $Z_{12} \equiv j\omega L$

Характер связи контуров:

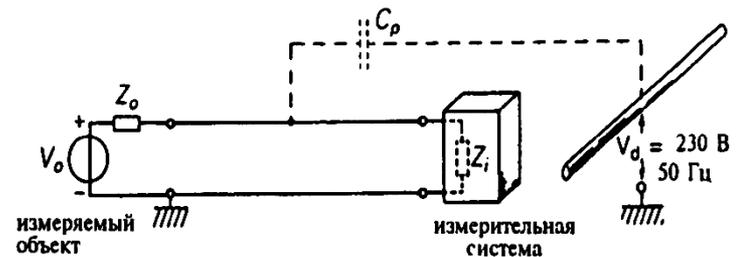


Характер связи контуров

Токи утечки ($Z_{12}=R$)

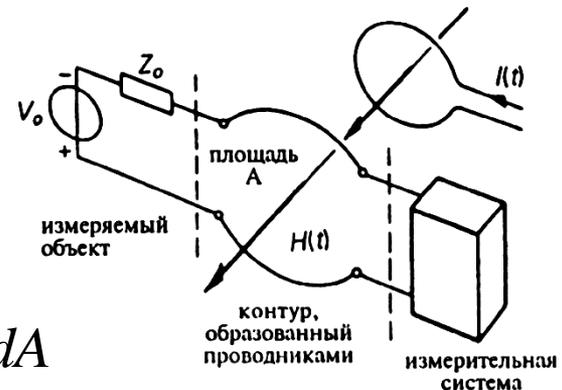


Емкостная наводка
($Z_{12}=1/i\omega C$)



Индуктивная наводка
($Z_{12}=i\omega L$)

$$V_d = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt} \int_A H dA$$





Источники помех

- Космические $S = 1369 \pm 14 \text{ Вт} / \text{м}^2$

- Атмосферные $Q_s \sim 10^{-9} \text{ К} / \text{м}^2$
 $E \sim 100 \text{ В} / \text{м}$

Спокойная атмосфера $\sim 10^{-16} \text{ А} / \text{см}^2$

Снег, дождь $\sim 10^{-10} \text{ А} / \text{см}^2$

Ливень, град $\sim 10^{-8} \text{ А} / \text{см}^2$

Молния 500 кА

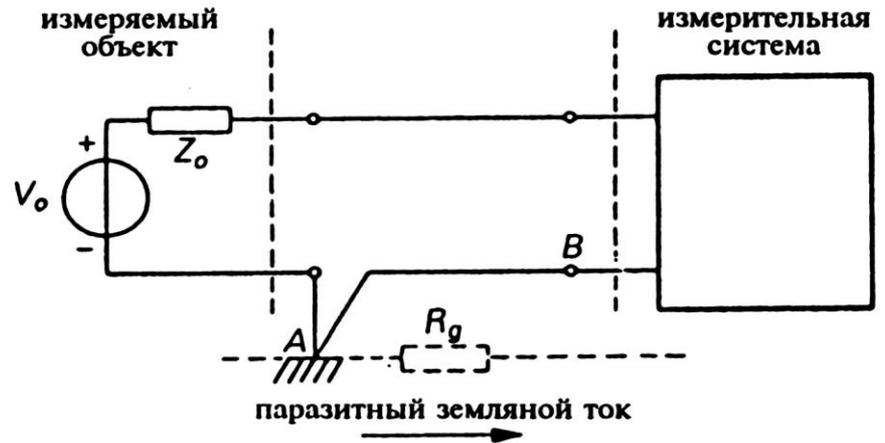
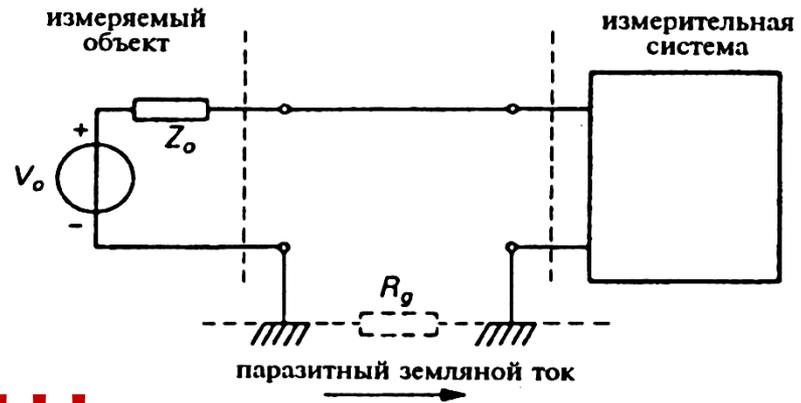
- Промышленные - электрические, сейсмические, химические и др



Заземление

Заземлять в одной точке
Не умножать петель

!!!

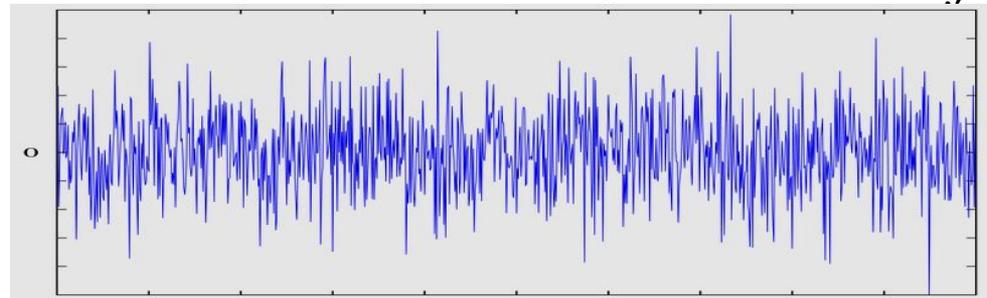
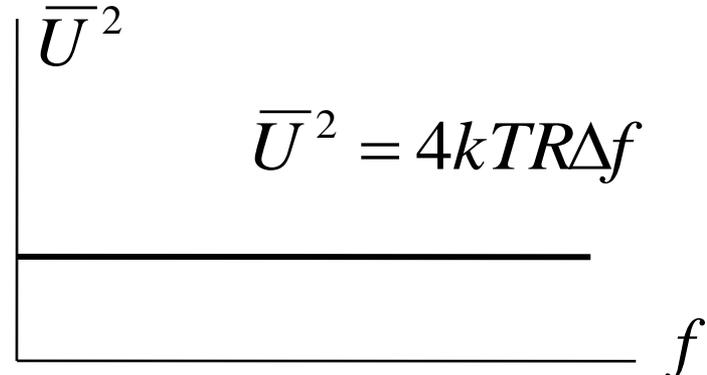




Спектрально независимый «белый» шум

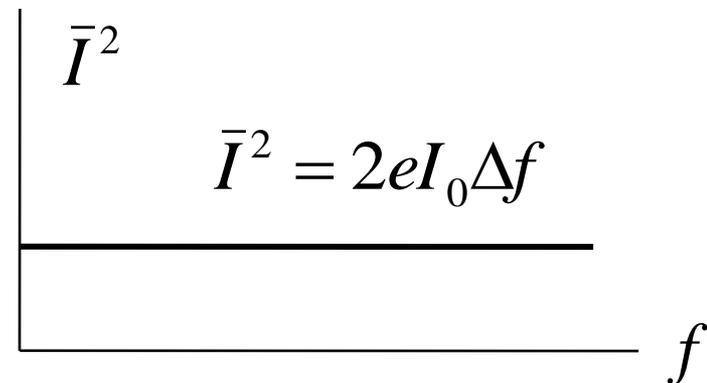
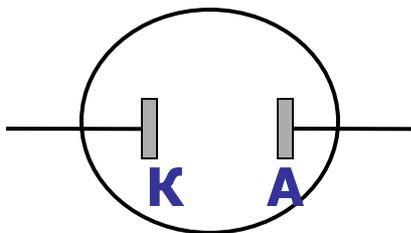
Равновесный тепловой

Nyquist (1927)



Неравновесный дробовой

Schottky



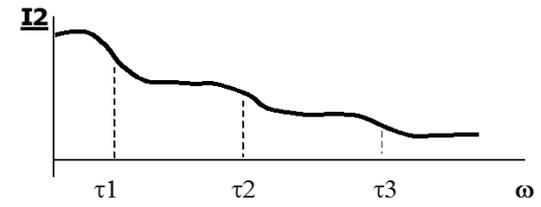
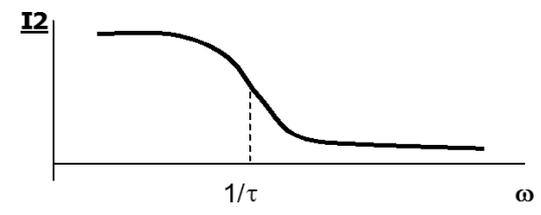


Спектрально зависимый шум

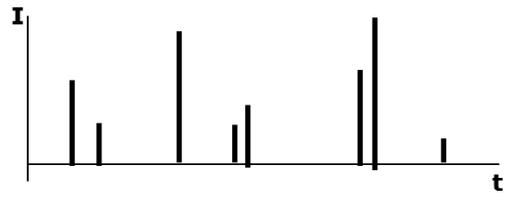
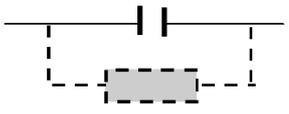
Генерационно - рекомбинационный



$$\overline{I^2} = B \frac{I_0^2}{1 + (\omega\tau)^2}$$



Импульсный



Фликкер (1/f)

Johnson (1925)

$$\overline{I^2} = \frac{A}{f^\alpha}$$

