



# ИЯУ МИФИ

Кафедра №7 «Экспериментальной ядерной физики и космофизики»



Специальность: 140302 – физика атомного ядра и частиц

Специализация: микро- и космофизика

Дисциплина: Ядерная электроника

Группа Т07-07

## Лекция №3

# Зарядочувствительный предварительный усилитель

2012/2013

# План лекции

- Зарядочувствительный усилитель
- Шумы и фильтрация сигналов
- Эквивалентный шумовой заряд

# Зарядочувствительный усилитель

Для большинства ППД емкость детектор зависит от  $U_{см}$

$$C_d = \sqrt{U_{см}}$$

На выходе интегрирующей цепи обычного усилителя

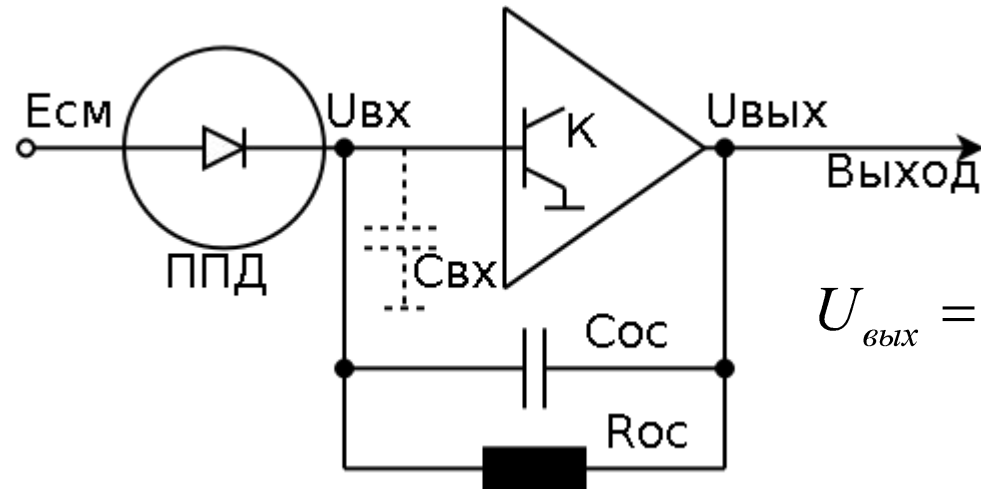
$$U_{вх} = Q / C_{вх} \approx Q / C_d$$

$$C_{вх} = C_d + C_{вх.ус} \quad C_d > C_{вх.ус} \quad C_{вх} \approx C_d$$

Нестабильность ёмкости детектора сильно влияет на сигнал и требует использовать предварительный усилитель с малыми шумами, с применением отрицательной обратной связи.

# Предусилитель с ООС для детекторов с малой ёмкостью

Обратная связь реализована через ёмкость  $C_{oc}$  и позволяет устранить зависимость от  $U_{см}$ .



$$Q = Q_{вх} + Q_{ос}^{см} \quad Q_{вх} = C_{вх} U_{вх}$$

$$Q_{ос} = C_{ос} (U_{вх} - U_{вых})$$

$$U_{вых} = -K U_{вх}$$

$$U_{вых} = - \frac{Q}{\frac{C_{вх} + C_{ос}}{K} + C_{ос}} \quad \frac{C_{вх} + C_{ос}}{K} \ll C_{ос}$$

Т.к.  $C_{вх}$  и  $C_{ос}$  одного порядка и усиление велико, то  $U_{вых} \approx - \frac{Q}{C_{ос}}$

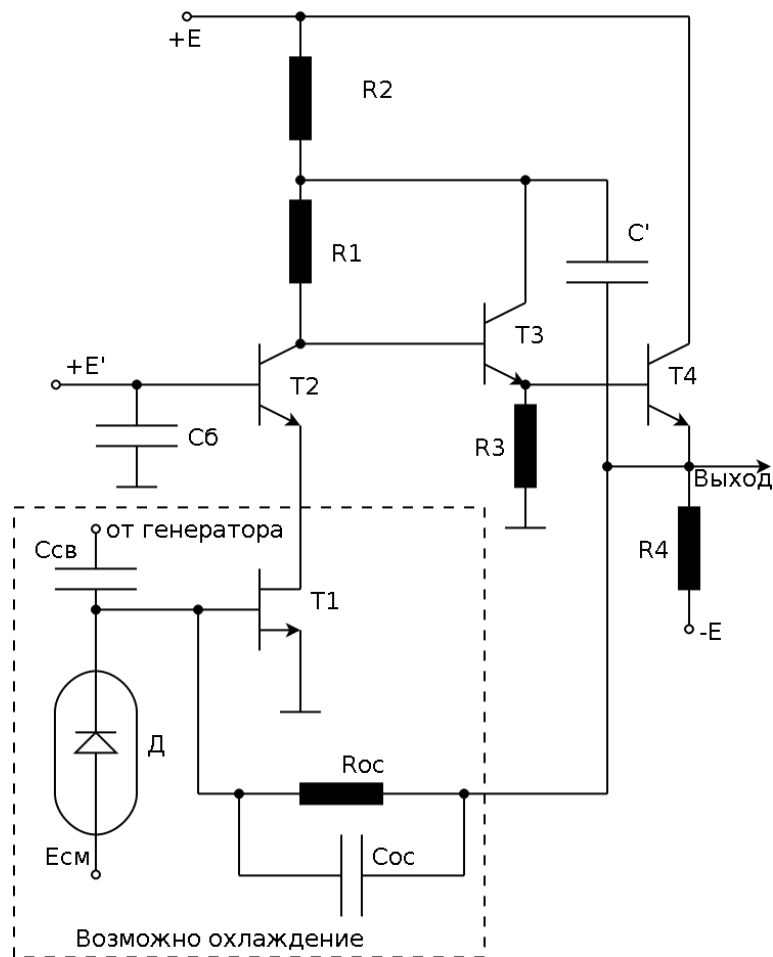
Введение отрицательной обратной связи стабилизирует не только усилительно, но источник сигнала - детектор

# Предусилитель с ООС для детекторов с малой ёмкостью

Ёмкость  $C_{oc}$  должна иметь высокую стабильность и малую зависимость от температуры. Часто параллельно  $C_{oc}$  подключают  $R_{oc}$ , которое обеспечивает обратную связь по постоянному току и фактически определяет сопротивление детектора  $R_d$ , поэтому  $\tau_{вх} = R_{oc} C_{oc}$ .

# Предусилитель с зарядовой обратной связью.

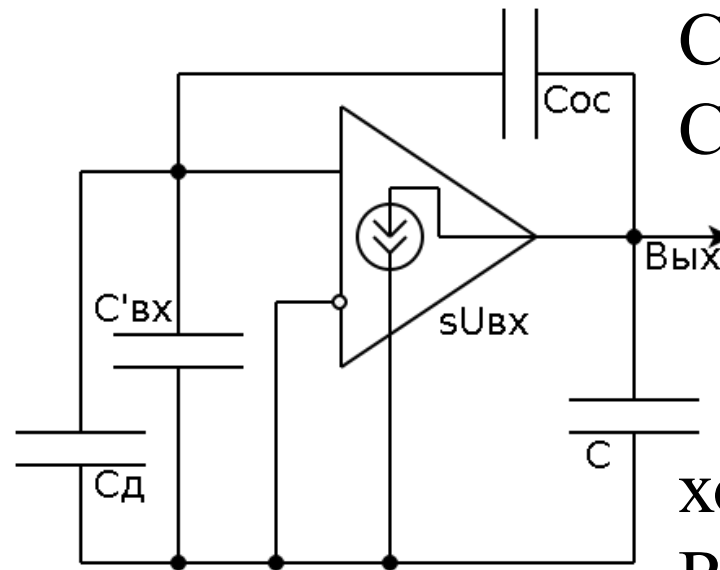
Принципиальная схема построенная на базе каскада полевого и нескольких биполярных транзисторов.



# ЗЧУ для детекторов большой ёмкости.

С детекторами относительно большой ёмкости (100 – 1000 пФ) для обеспечения должного быстродействия применяют небольшое сопротивление нагрузки, которое является источником тепловых шумов. В таких случаях используют ЗЧУ, у которого входное сопротивление стабилизируется с помощью последовательной отрицательной обратной связи.

# ЗЧУ с последовательной ООС



Упрощенная схема ЗЧУ

$$C_{вх} = C_{д} + C'_{вх},$$

$C_{ос} \ll C$ ,  $C$  – паразитная ёмкость

Входная проводимость:

$$Y_{вх} = S \cdot \frac{C_{ос}}{C} + p(C_{вх} + C_{ос})$$

где первое слагаемое – это

холодное сопротивление:

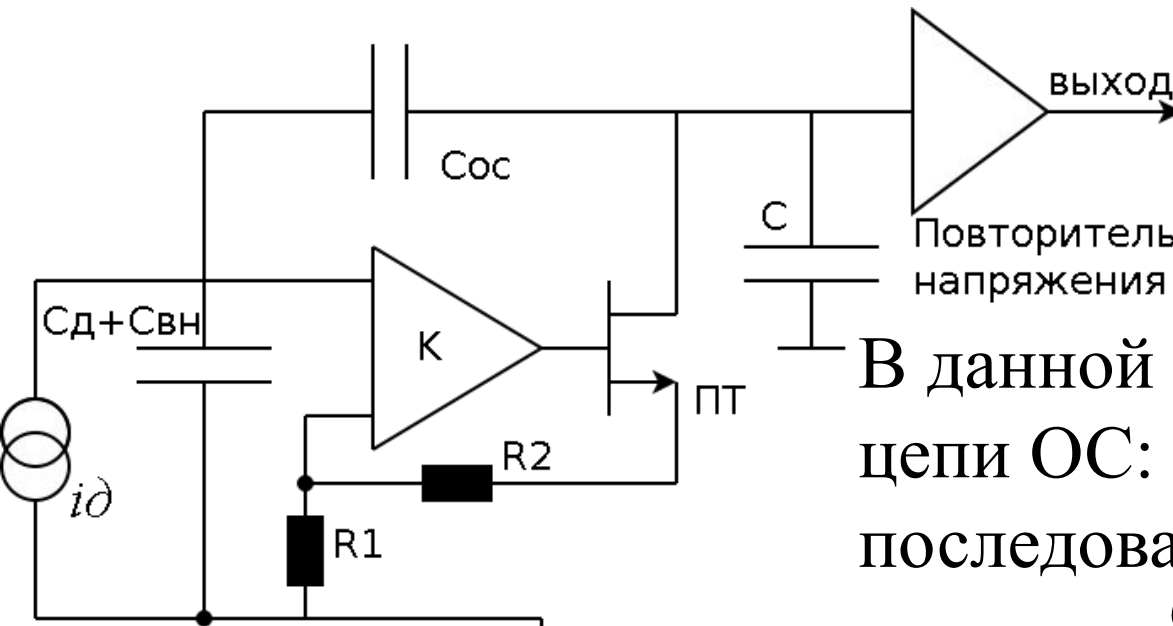
$$R_c = \frac{1}{S} \cdot \frac{C}{C_{ос}}$$

$R_c$  – сопротивление резистора при комнатной температуре.

Стабильность  $R_c$  определяется крутизной  $S$  входного транзистора. Регулирование можно производить с помощью  $C_{ос}$ .



# ЗЧУ с последовательной ООС



В данной схеме применяется две цепи ОС: параллельная  $C_{oc}$  и последовательная  $R_1, R_2$ .

Холодное сопротивление:  $R'_c = R \cdot \frac{C}{C_{oc}}$

На низких частотах фактически является входным сопротивлением детектора, имеет хорошую стабильность и регулируется с помощью  $C_{oc}$  и  $C$ .

# Шумы и фильтрация сигналов

При усилении слабых сигналов детекторов трудности вызывают шумы – случайные флуктуации напряжения, возникающие одновременно с исследуемым сигналом.

По происхождению шумы делятся:

- помехи (наводки)
- флуктуации эл. Заряда в транзисторах и деталях.

Для удобства шумы оценивают относительно входа усилителя:

$$U_{ш.вх} = \frac{U_{ш.вых}}{K}$$

# Контурные (тепловые) шумы.

Флуктуации напряжения на зажимах резистора, вызванные тепловыми движениями свободных электронов. Тепловые шумы содержат весь спектр от 0 до  $\infty$ . Среднеквадратичное значение шумов:

$$\overline{U_{шт}^2} = 4kT \int_{f_n}^{f_v} R_{акт} df \quad \text{Формула Найквиста}$$

Спектральная плотность – распределение энергии по частотному спектру:

$$\frac{d\overline{U_{шт}^2}}{df} = 4kTR_{акт}$$

# Контурные шумы

В реальной схеме кроме сопротивления нагрузки  $R_H$  имеется ёмкость  $C_{вх}$ , активная составляющая входной цепи:

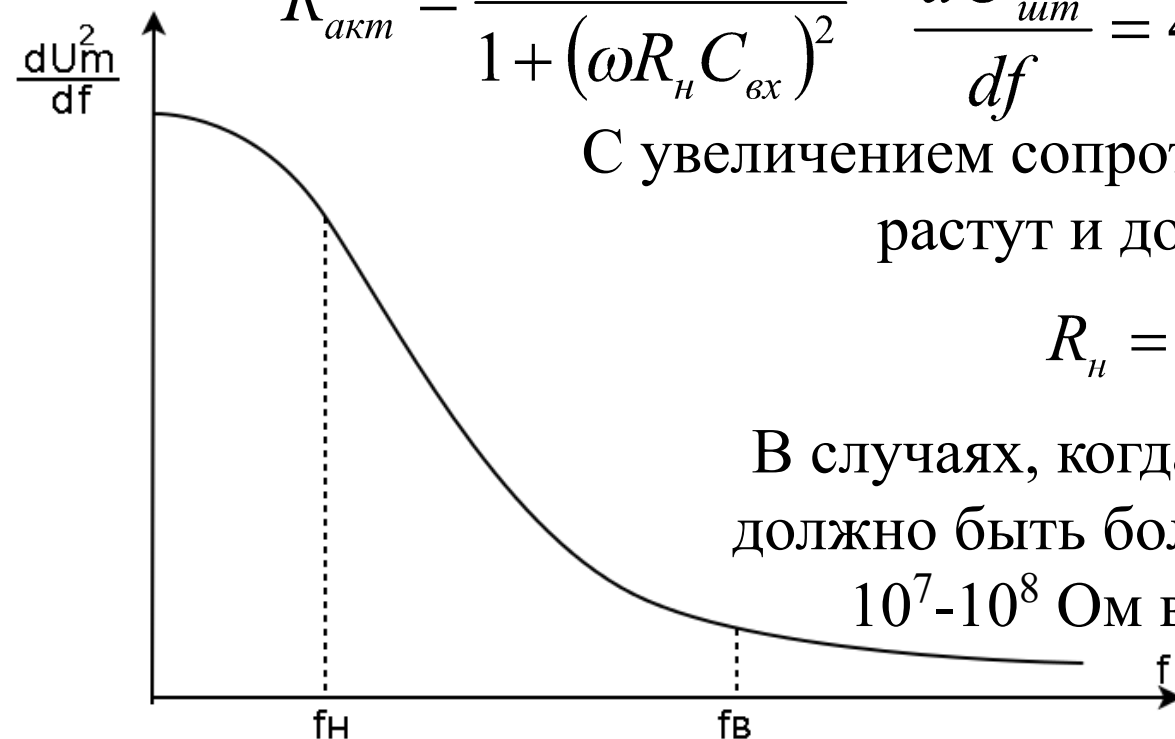
$$R_{акт} = \frac{R_H}{1 + (\omega R_H C_{вх})^2} \quad \frac{dU_{шм}^2}{df} = 4kT \frac{R_H}{1 + (\omega R_H C_{вх})^2}$$

С увеличением сопротивления нагрузки шумы растут и достигают максимума при:

$$R_H = \frac{1}{2\pi \cdot C_{вх} \sqrt{f_H f_B}}$$

В случаях, когда входное сопротивление должно быть большим, его следует брать

$10^7 - 10^8$  Ом во избежание повышения шумов



# Шумы входного тока активного элемента

Цепь управляющего электрода активного элемента (транзистора или лампы) является источником шумов, вызванных флуктуациями входного тока  $i_{вх}$ .

$$\frac{di_{ш.вх}^2}{df} = 2ei_{вх} \quad \text{Формула Шоттки}$$

Для комплексного входного сопротивления  $R_{н} C_{вх}$  шумы напряжения имеют спектральную плотность:

$$\frac{dU_{ш.вх}^2}{df} = 2ei_{вх} \frac{R_{н}^2}{1 + (\omega R_{н} C_{вх})^2}$$

# Шумы выходного тока активного элемента (дробовый шум)

Флуктуации канального тока полевого транзистора.

Спектральная плотность:

F – коэффициент сглаживания.

$$\overline{\frac{di_{ш.д.}^2}{df}} = 2ei_{вых}F^2$$

Дробовый шум удобно

приводить к входу схемы и рассматривать как флуктуации выходного напряжения. Для полевого

транзистора:

$$\overline{\frac{dU_{ш.д.}^2}{df}} = \frac{0,7}{S}$$

Контурные шумы и дробовые равномерно распределены по спектру (белый шум).

# Фликкер шум

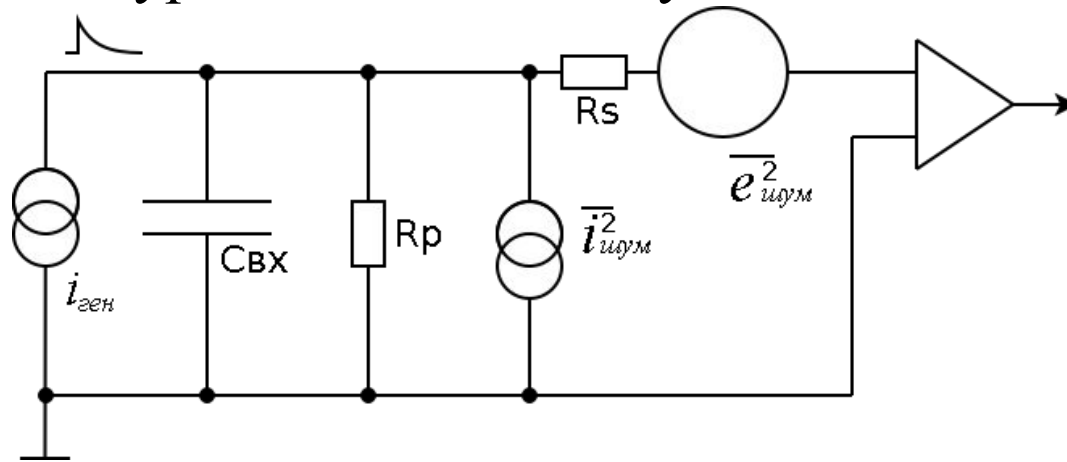
У активных элементов также имеется неравномерный фликкер-шум со спектральной плотностью:

$$\frac{\overline{dU_{ш.ф.}^2}}{df} \sim \frac{1}{f}$$

В линейных импульсных усилителях, имеющих полосу пропускания в области высоких частот, составляющая фликкер-шумов невелика и ею можно пренебречь.

# Эквивалентная схема входа с ИСТОЧНИКОМ ШУМОВ

Для оценки влияния шумов, источник шума заменяют активным сопротивлением, генерирующим тепловые шумы. Контурные и входной шумы заменяют на эквивалентным  $R_p$ .



$$\frac{\overline{dU_{ш.м}^2}}{df} + \frac{\overline{dU_{ш.вх}^2}}{df} = \frac{4kT}{\omega^2 C_{вх}^2 R_p}$$

$$R_p = \frac{R_H}{1 + \frac{e_{i_{вх}} R_H}{2kT}}$$

Дробовый шум эквивалентен активному сопротивлению  $R_s = \frac{0,7}{4kTS}$

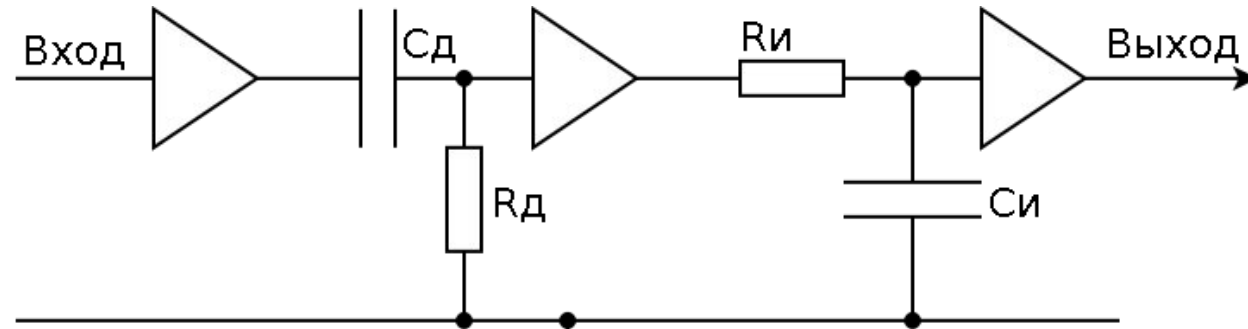
На схеме три источника шума заменены на генераторы белого шума:

$$\overline{e_{ш}^2} = 4kTR_s \quad \overline{i_{ш}^2} = \frac{4kT}{R_p}$$



# Эквивалентный шумовой заряд и фильтрация простейшими CR-RC цепями

При измерении амплитуды стремятся к максимуму соотношения сигнал/шум. При анализе заряда с детектора удобно шум заменить эквивалентным шумовым зарядом:  $q_{ш} = U_{ш}^2$



Выбрав равные  $\tau_d = \tau_i = \tau$  найдём шумы теплового и входного тока.

$$q_{ш.p} = \sqrt{4kT} \cdot \sqrt{\frac{\tau}{R_p}}$$

Тепловые и входной шумы

$$q_{ш.s} = \sqrt{4kT} \cdot \sqrt{\frac{R_s}{\tau} C^2}$$

Дробовый шум

# Эквивалентный шумовой заряд и фильтрация простейшими CR-RC цепями

В эквивалентной схеме  $R_p$  и  $R_s$  имеют разную зависимость от параметров CR-RC цепи, оптимальное соотношение сигнал/шум достигается при:

$$q_{ш\Sigma} = q_{ш.p} + q_{ш.s} = \sqrt{4kT} \cdot \sqrt{\frac{\tau}{R_p} + C^2 \frac{R_s}{\tau}}$$

После дифференцирования по  $\tau$ , находим минимум при:

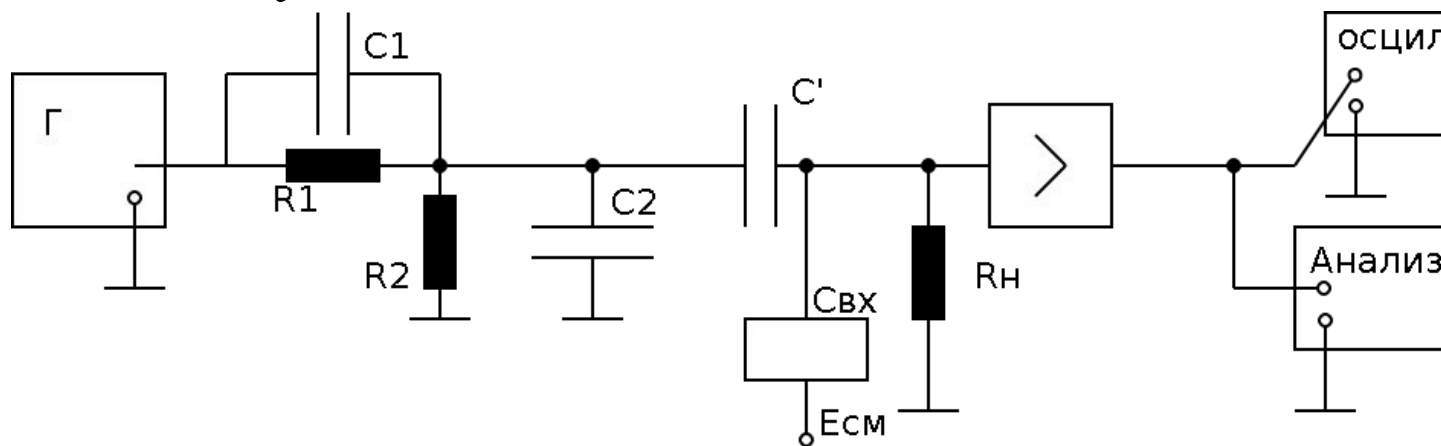
$$\tau_0 = C_{вх} \sqrt{R_p R_s}$$

И минимальный шумовой заряд:

$$q_{шум\Sigma \min} = \sqrt{4kT} \sqrt[4]{\frac{R_p}{R_s}}$$

# Экспериментальное определение уровня шумов

Методика для таких измерений не должна нарушать нормальную работу детектора, от которого поступает исследуемый сигнал.



Для измерения в единицах заряда, нужен импульсный генератор.

# Экспериментальное определение уровня шумов

По осциллограмме измеряют отношение выходного  
сигнал/шум  $U_{\text{ш.вых}}/U_{\text{вых}}$

$$U_{\text{ш}} = \frac{U_{\text{вх}} U_{\text{ш.вых}}}{U_{\text{вых}}} \quad U_{\text{вх}} = \frac{U_z C'}{C_{\text{вх}} + C'} \quad U_{\text{вх}} = \frac{Q}{C_{\text{вх}} + C'}$$

Шумовой заряд

$$Q_{\text{ш}} = \frac{U_{\text{ш.вых}} Q}{U_{\text{вых}}}$$