МИНОБРНАУКИ РОССИИ

«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ” им. В. И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ)

Факультет радиотехники и телекоммуникаций,
Кафедра Теоретических основ радиотехники

http://kepstr.eltech.ru/tor/ptri

А.А. Данилин

«Приборы и техника радиоизмерений»

(электронный конспект лекций)

Часть 2

Санкт-Петербург
2023 г.

СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)

Факультет радиотехники и телекоммуникаций

http://kepstr.eltech.ru/tor/ptri

Кафедра Теоретических основ радиотехники

А.А. Данилин

«Приборы и техника радиоизмерений»

(электронный конспект лекций)

Измерение параметров радиосигналов. Модулометры. Цифровые вольтметры

Санкт-Петербург
2024 г.

Классификация методов и средств исследования радиосигналов

Модулированный радиосигнал

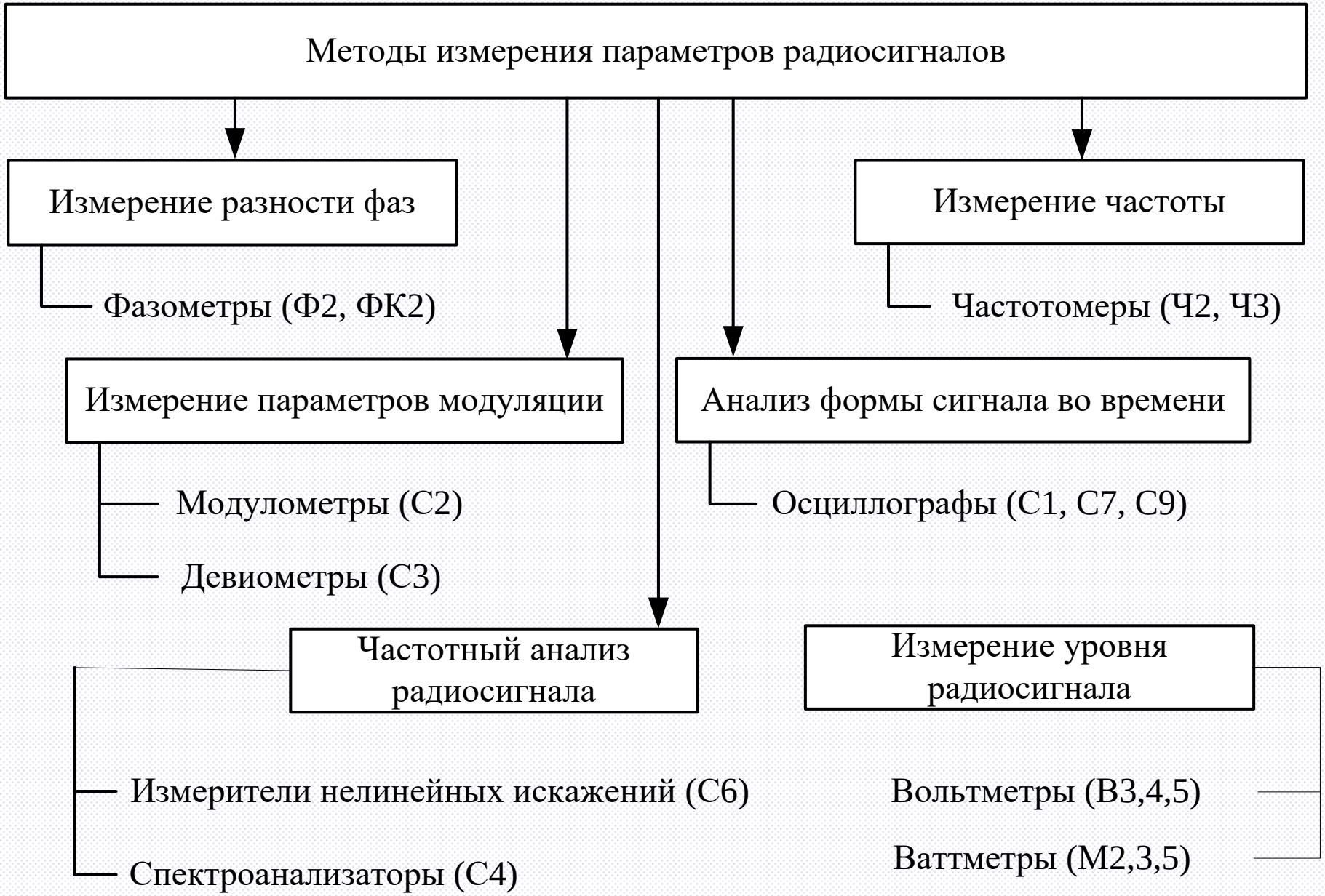
$$u(t) = U(t)\cos(2\pi ft + \varphi(t)) = U(t)\cos(\Phi(t))$$

$U(t)$ – закон изменения амплитуды, f – несущая частота, $\varphi(t)$ – закон изменения начальной фазы, $\Phi(t)$ – полная фаза

Мгновенная частота радиосигнала

$$f(t) = \frac{1}{2\pi}\frac{d\Phi}{dt} = f + \frac{1}{2\pi}\frac{d\varphi(t)}{dt}$$

Скорость изменения амплитуды и начальной фазы *у радиосигнала* малы по сравнению со скоростью изменения полной фазы. Спектр радиосигнала узкий и сосредоточен вблизи частоты несущей


Методы измерения параметров радиосигналов
Измерение разности фаз
Фазометры (Ф2, ФК2)
Измерение частоты
Частотомеры (Ч2, Ч3)
Измерение параметров модуляции
Модулометры (С2)
Девиометры (С3)
Анализ формы сигнала во времени
Осциллографы (С1, С7, С9)
Частотный анализ радиосигнала
Измерители нелинейных искажений (С6)
Спектроанализаторы (С4)
Измерение уровня радиосигнала
Вольтметры (В3,4,5)
Ваттметры (М2,3,5)

Три основных вида модуляции радиосигналов:

- *амплитудная* (АМ)
- *частотная* (ЧМ)
- *фазовая* (ФМ)

Параметры *гармонической* АМ: **коэффициент амплитудной модуляции *m***, частота модуляции F, фаза сигнала модуляции Θ

$$U(t) = U_m(1 + m \cdot \cos(2\pi Ft + \theta))\cos(2\pi ft + \varphi)$$

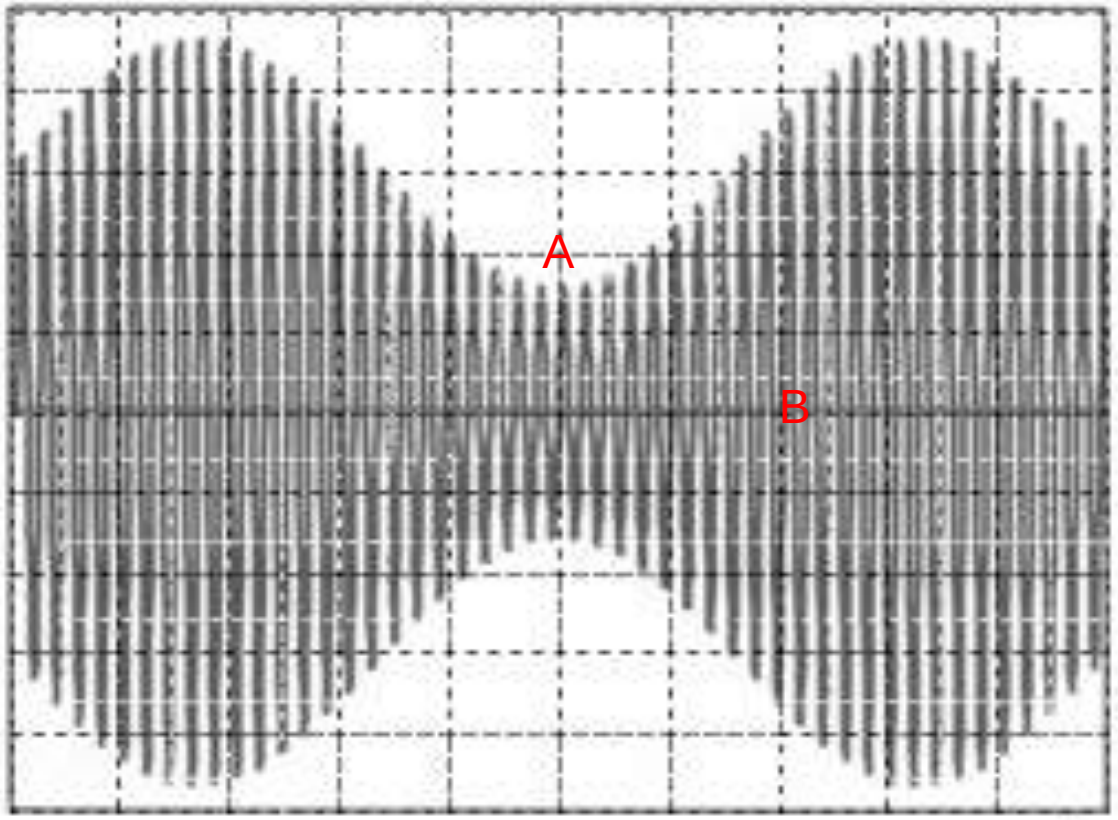
Параметр *гармонической* ЧМ: ***девиация частоты Δf***, которая определяет максимальное отклонение мгновенной частоты от несущей f_0:

$$f(t) = f_0 + \Delta f \cos(2\pi Ft + \theta)$$

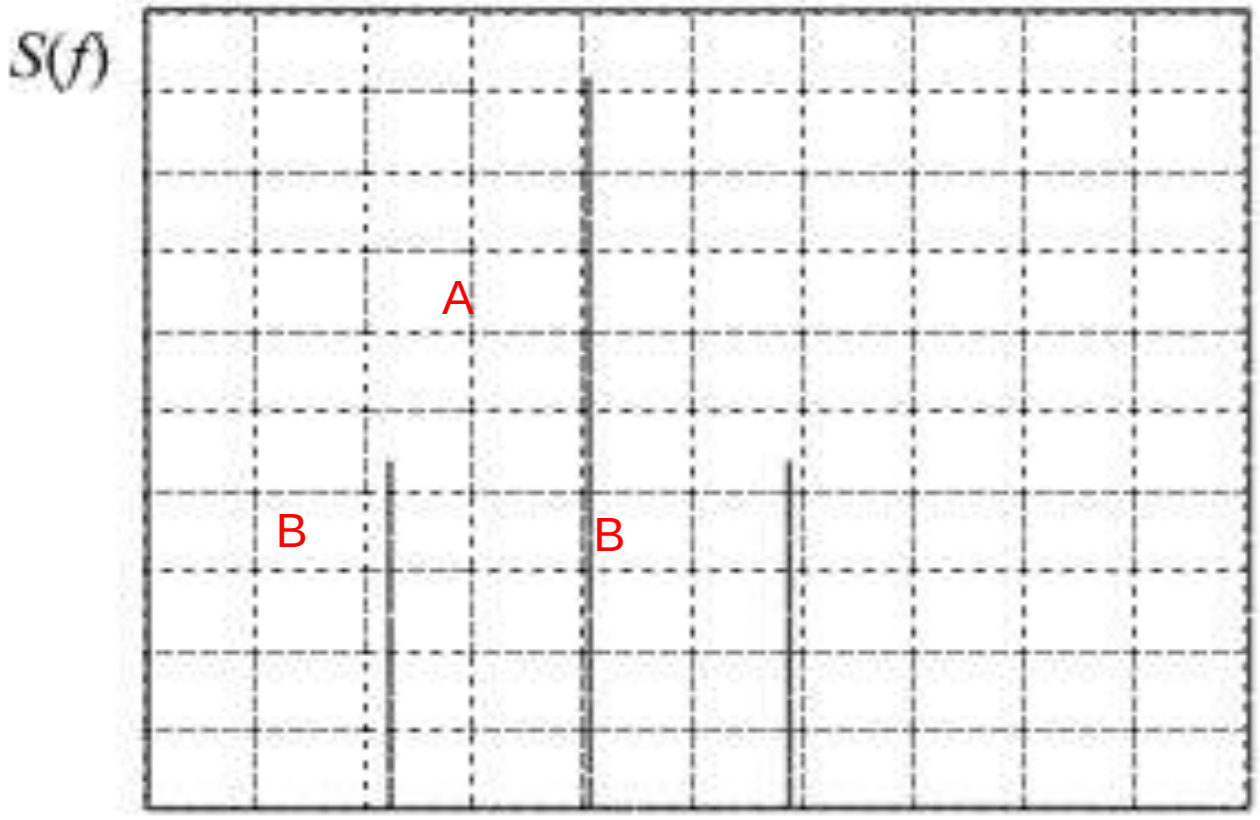
Параметр *гармонической* ФМ: ***индекс модуляции β*** *(девиация фазы)*, который определяет максимальное отклонение начальной фазы и выражается в радианах

$$\Phi(t) = 2\pi f_0 t + \beta\cos(2\pi Ft + \theta) + \phi_0 \qquad \beta = \frac{\Delta f}{F}$$

Измерение коэффициента АМ осциллографом и анализатором спектра



а



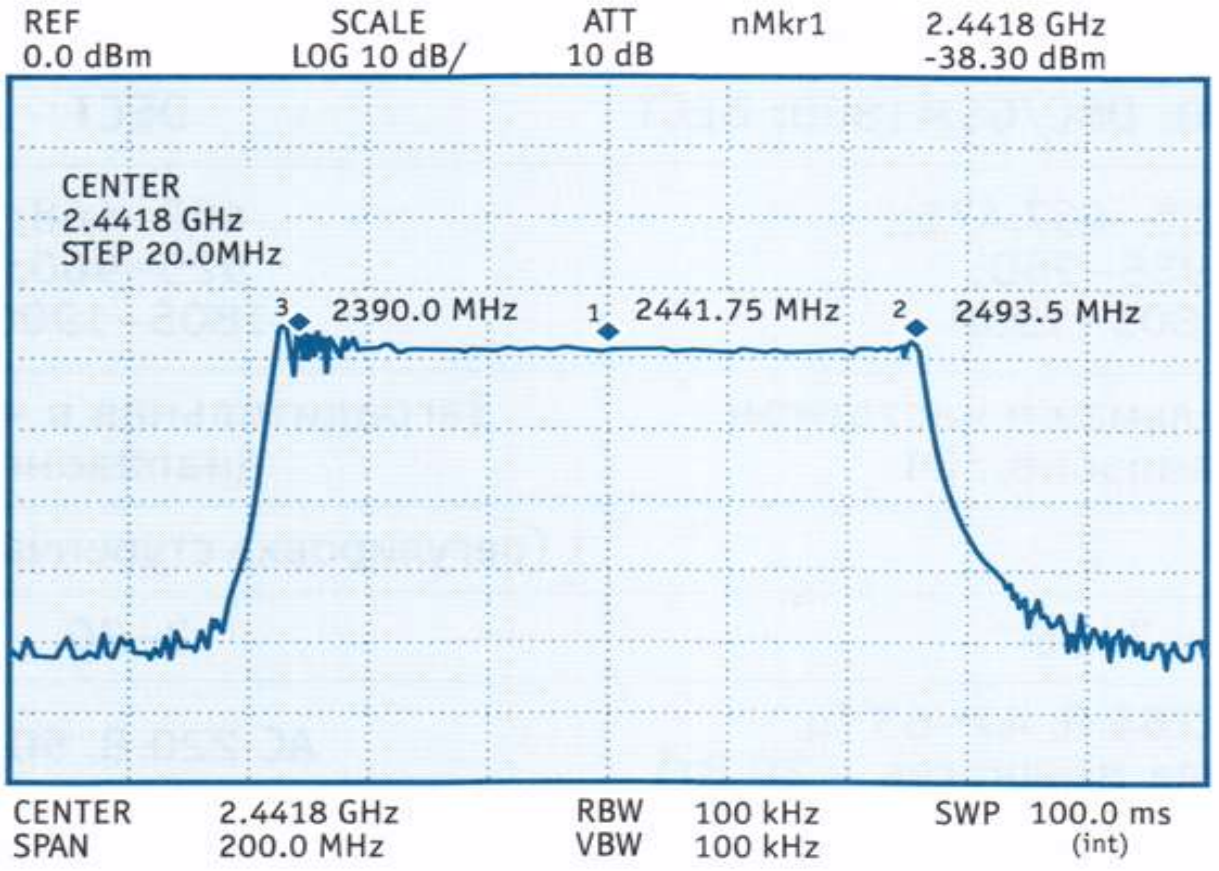
б

$$m = \frac{A - B}{A + B} \cdot 100\%$$

$$m = \frac{2B}{A} \cdot 100\%$$

Измерение девиации частоты Δf по виду амплитудного спектра ЧМ радиосигнала

При большом индексе модуляции ширина спектра примерно равна 2Δf



При малом индексе модуляции спектр ЧМ сигнала содержит две боковые составляющие (этто похоже на спектр АМ сигнала, но фазы их противоположны). Расстояние между ними равно удвоенной частоте модуляции 2F



Вид **спектра ЧМ** сигнала с тональной модуляцией и результат его программной демодуляции (**три вида декодеров –** АМ, ЧМ и ФМ)

Измерение девиации частоты Δ*f* и индекса ФМ β с помощью анализатора спектра

Спектр ЧМ сигнала с гармонической модуляцией.

$$u(t) = U_m \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta)\cos\left[2\pi(f_0 + nF)t\right]$$

где J_n – функция Бесселя первого рода *n*-ного порядка, β – индекс ЧМ.

Амплитуда n-ной гармоники равна нулю при аргументе функции Бесселя, равному ее корню. Для первых трех порядков корни функций Бесселя равны

$$U_m J_n(\beta'_n) = 0$$

$$\beta'_0 = 2,4048 \qquad \beta'_1 = 5,5210 \qquad \beta'_2 = 8,6537 \qquad \beta'_3 = 11,7915$$

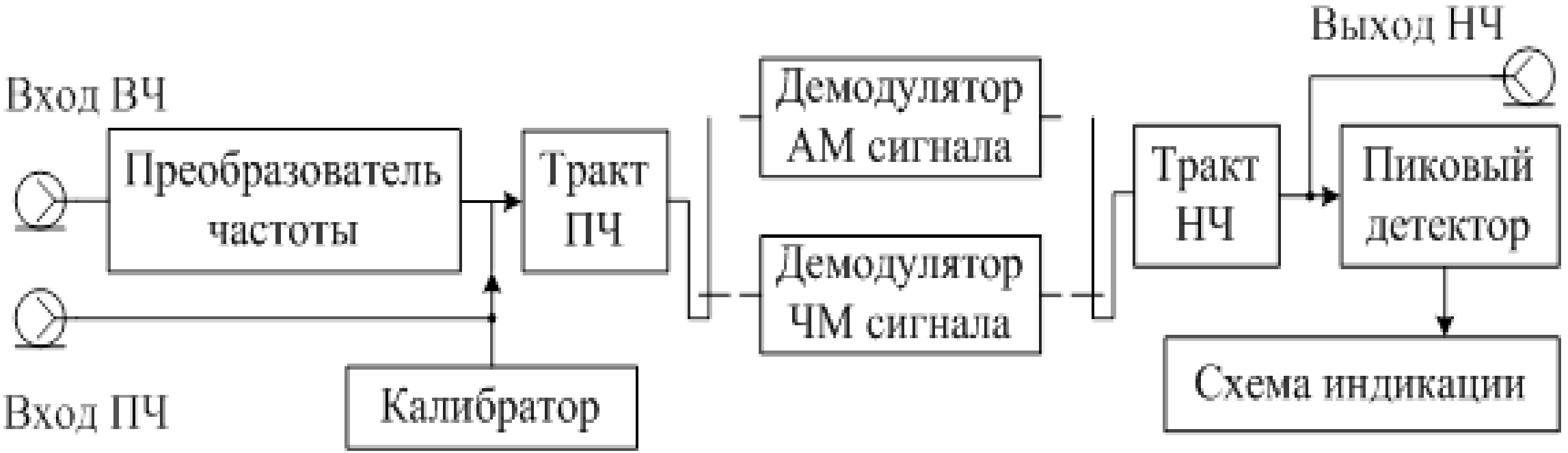
Наблюдая на АС спектр исследуемого сигнала, регулировкой частоты модуляции F добиваются ***нулевой амплитуды*** выбранной гармоники. Девиация частоты определяется формулой:

$$\beta'_n = \frac{\Delta f}{F} \quad \Rightarrow \quad \Delta f = \beta'_n \cdot F$$

Для нулевой гармоники

$$\Delta f = 2.4048 \cdot F$$

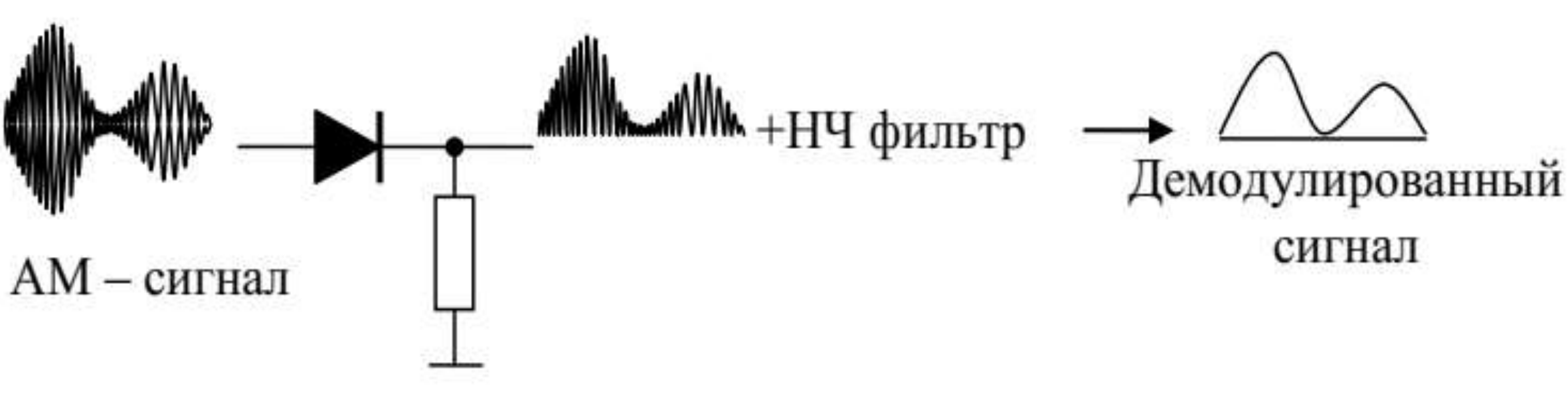
Модулометры и девиометры



Структурная схема супергетеродинного измерителя параметров модуляции.

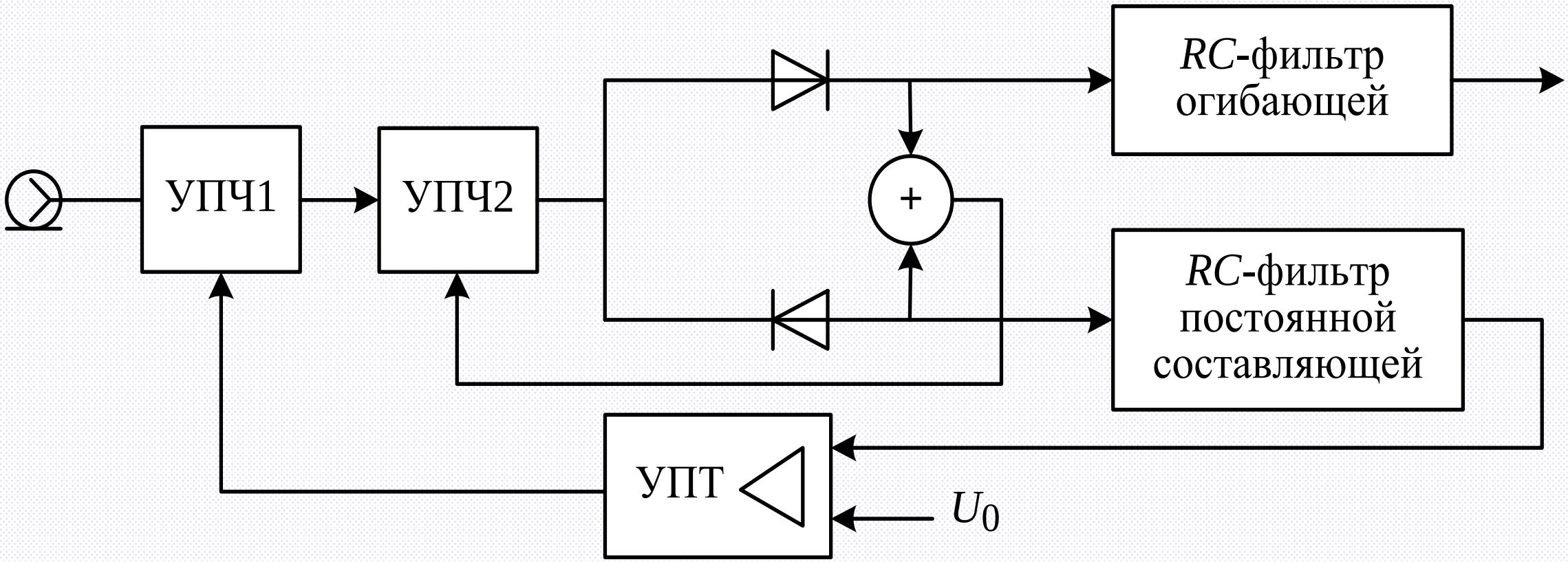
Комбинированный прибор для измерения как коэффициента АМ (модулометр С2-), так и девиации частоты ЧМ и индекса модуляции ФМ (девиометр С3-).

Процесс демодуляции АМ-сигнала детектором огибающей



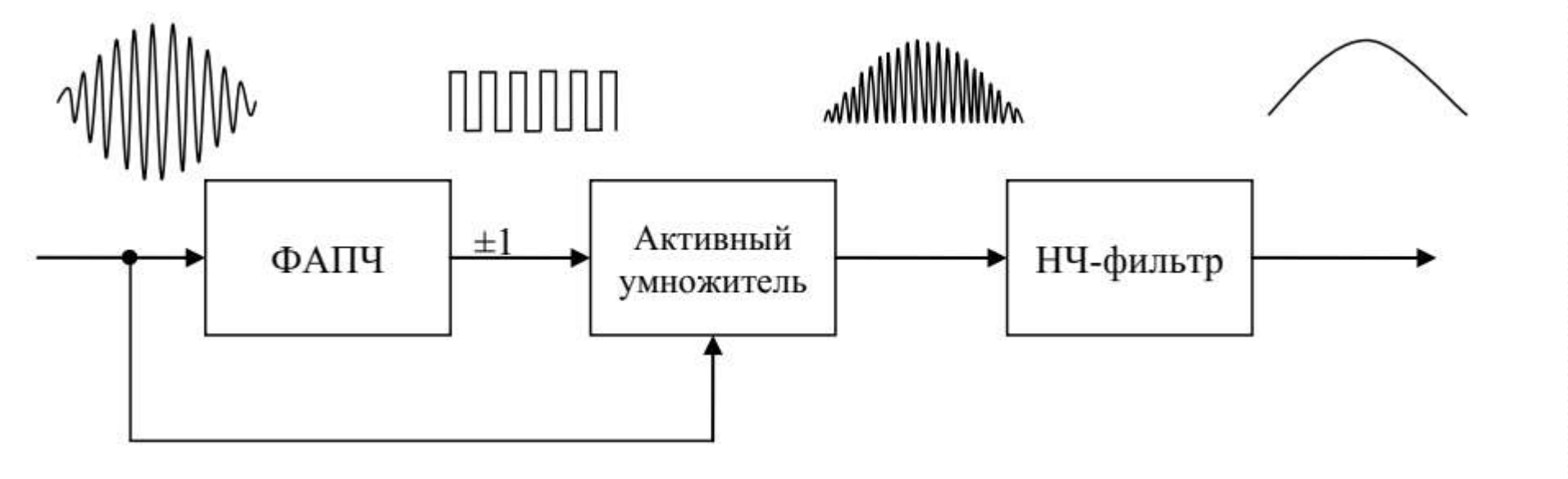
Полоса пропускания НЧ-фильтра должна обеспечивать неискаженную передачу сигнала модуляции, но эффективно сглаживать импульсы несущей частоты. Диод должен работать на линейном участке ВАХ (чтобы обеспечить постоянство коэффициента преобразования), для чего на него иногда подают напряжение смещения

Демодулятор (детектор) АМ с ООС



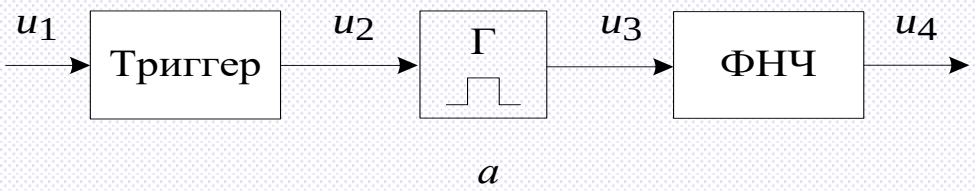
ООС по УПЧ2 позволяет *линеаризировать* характеристику демодуляции и расширить динамический диапазон прибора. ООС по УПЧ1 - стабилизация уровня несущей ПЧ

Демодулятор АМ с системой ФАПЧ

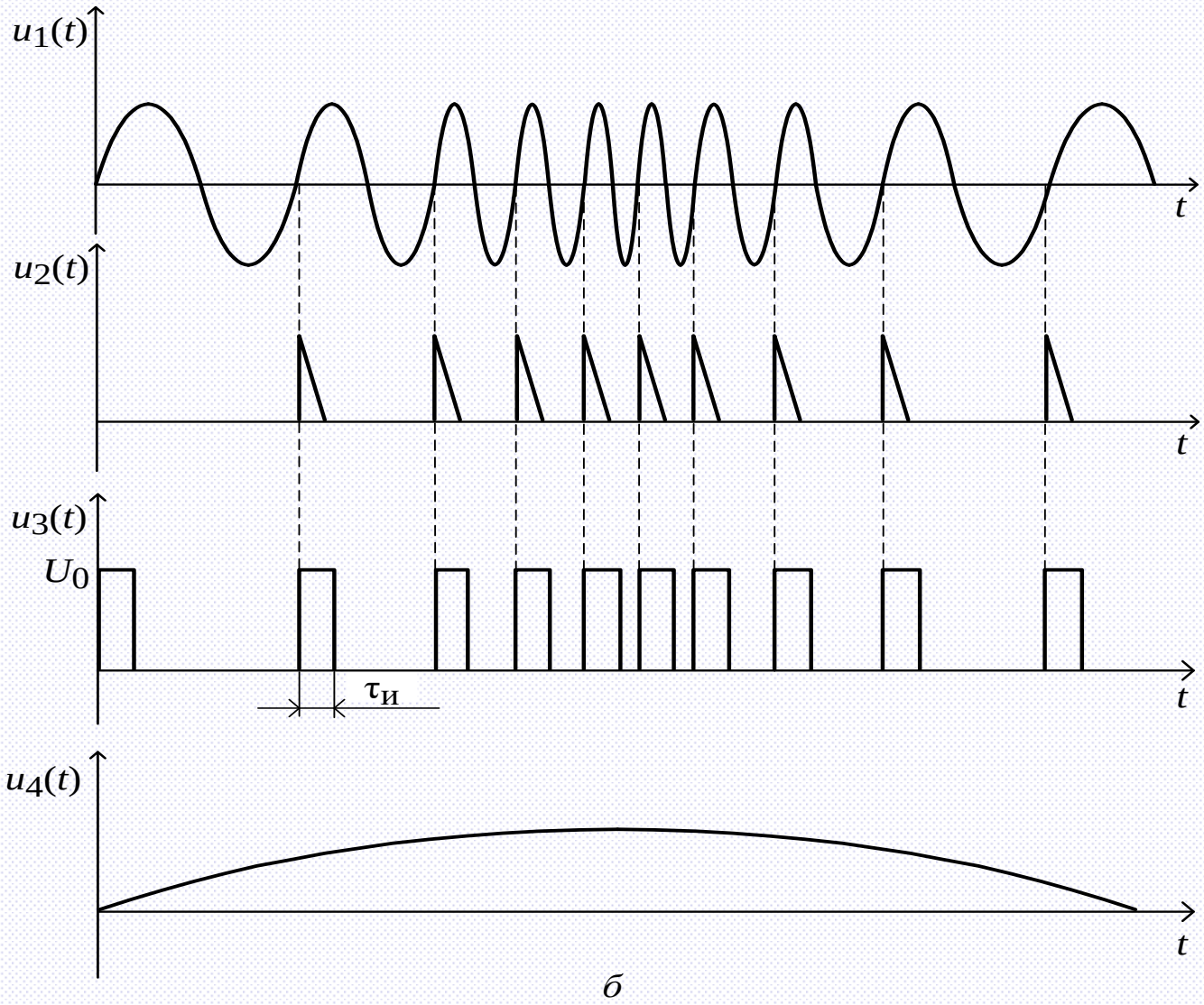


Система ФАПЧ содержит генератор, управляемый напряжением (ГУН), который вырабатывает меандр с частотой входного сигнала. Умножение меандра на входной сигнал позволяет получить только положительные полуволны, которые сглаживаются НЧ-фильтром. Такой демодулятор реализует т.н. «гомодинный метод детектирования», поскольку не требует гетеродинного преобразования частоты входного сигнала на фиксированную ПЧ.

«Счетный» ЧМ детектор



а



б

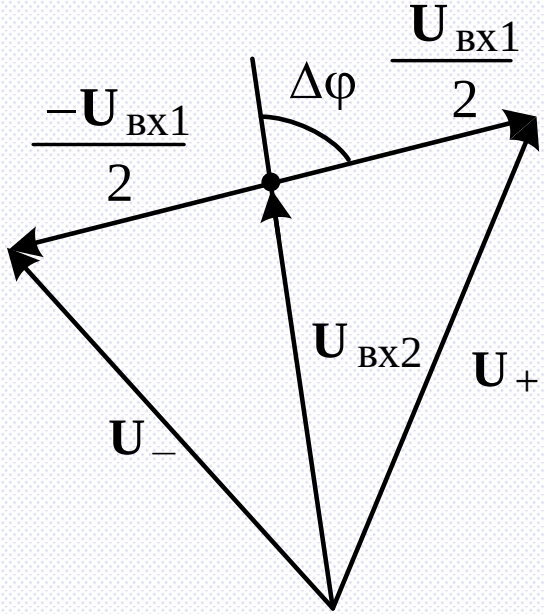
Достоинства счетного детектора:

- малая погрешность измерения девиации частоты (2-3%) в диапазоне измерения
- высокая линейность преобразования
- стабильность характеристики.

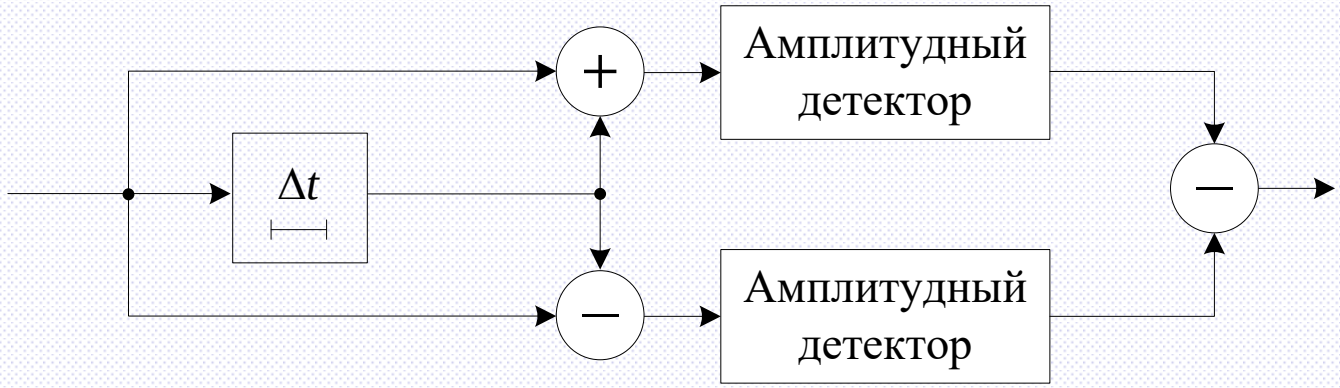
Недостаток:

- невысокая помехо-устойчивость (сильное влияние импульсных помех на результат демодуляции).

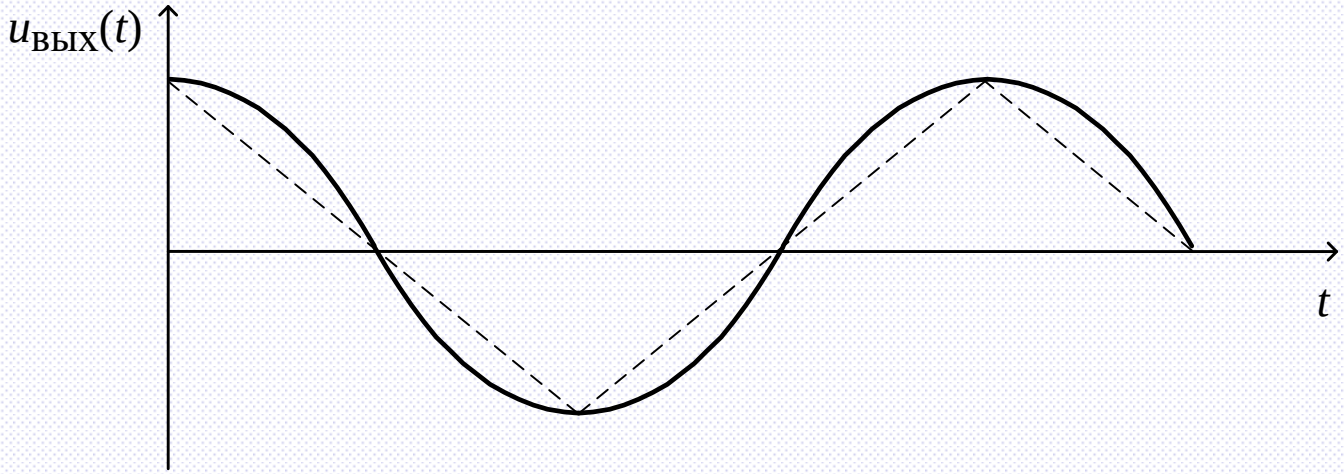
Частотный детектор с линией задержки



$$U_{вых} \equiv \cos(\Delta\varphi)$$



а

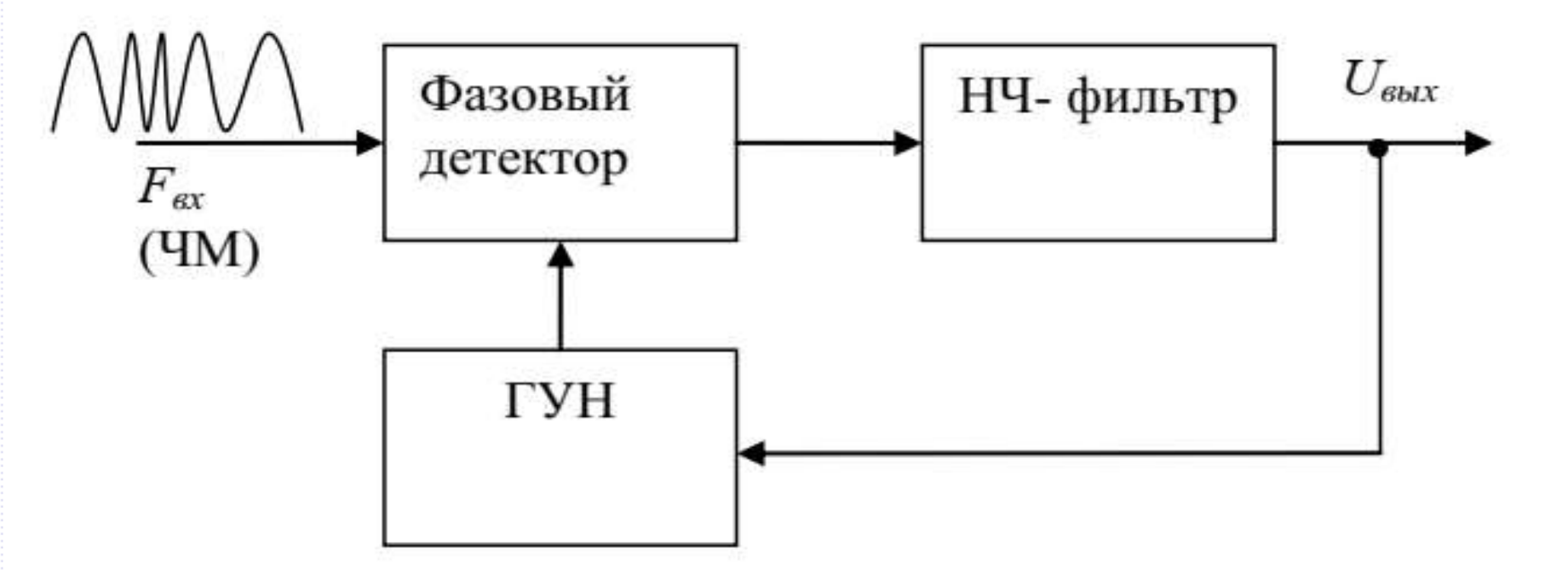


б

Частотный детектор будет работать на участке характеристики, близком к линейному, если задержка обеспечивает равенство

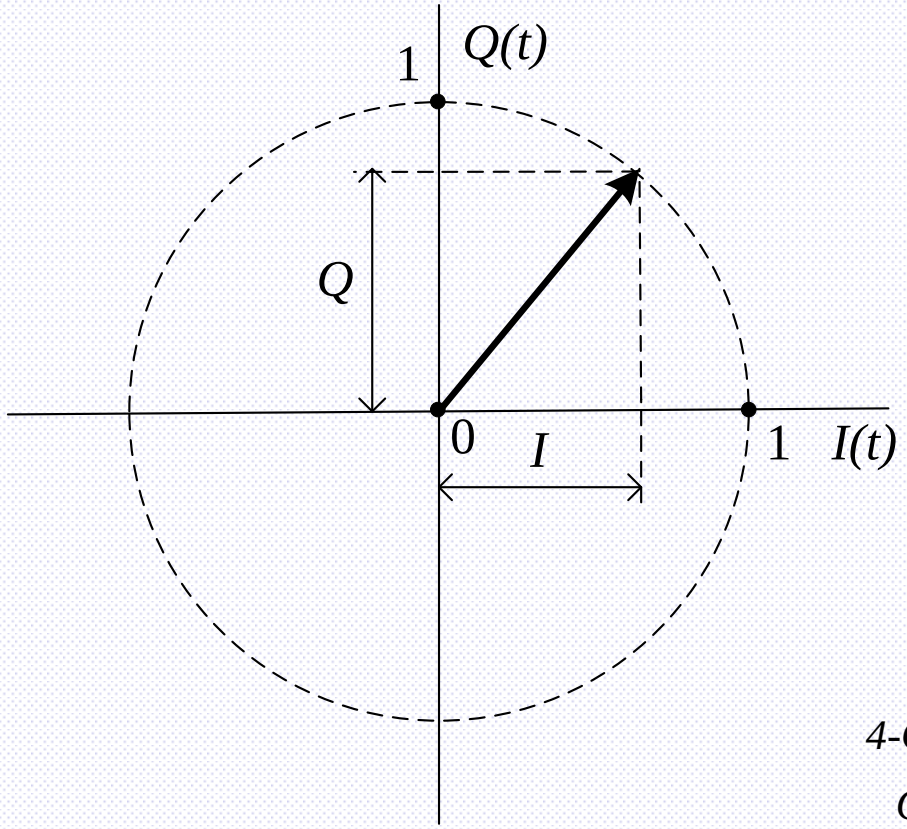
$$\omega_{пч}\tau_{з} = \frac{\pi}{4} + (2n+1)\pi, \text{ где } n = 0, 1, 2...$$

Использование системы ФАПЧ для прямой демодуляции ЧМ сигнала



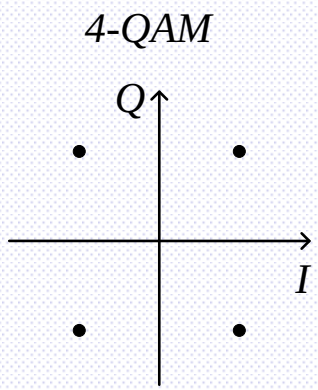
Система ФАПЧ синхронизируется с сигналом и следит за изменением его частоты. Напряжение, которое подается на генератор, управляемый напряжением (ГУН), пропорционально входной частоте. Он является результатом демодуляции ЧМ.. Полоса пропускания НЧ-фильтра должна быть выбрана достаточно широкой для неискаженного прохождения модулированного сигнала. ГУН должен иметь линейную модуляционную характеристику

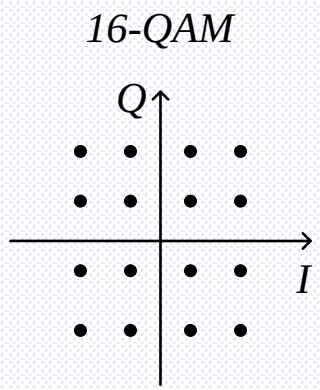
Измерение параметров сигналов с цифровой векторной модуляцией

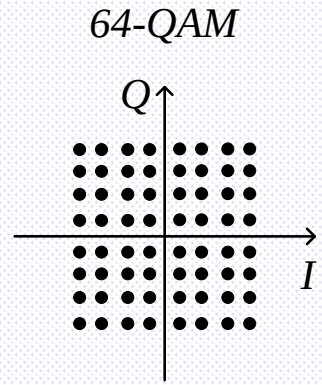


$$u(t) = I(t)\cos(2\pi f\, t + \varphi) - Q(t)\sin(2\pi f\, t + \varphi)$$

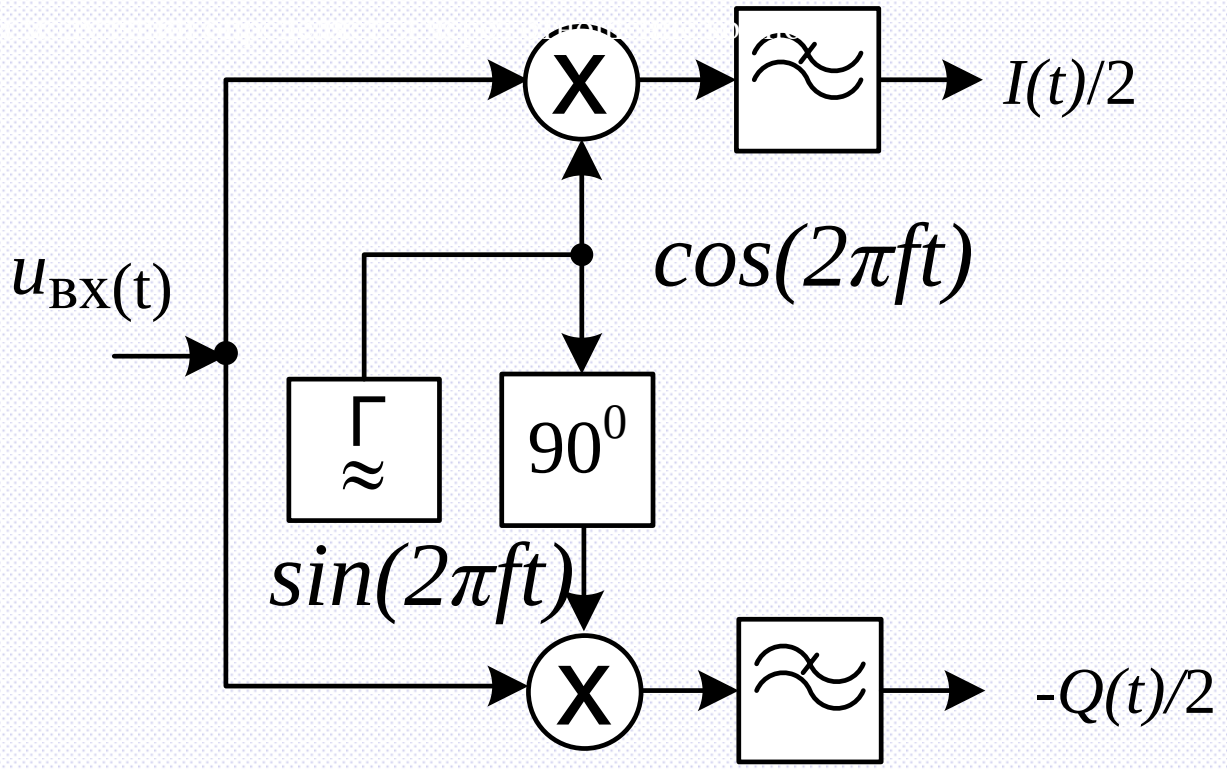
Вектор сигнала можно представить в виде квадратурных векторов (I/Q разложение)







Квадратурный демодулятор цифрового сигнала



АМ

$$U(t) = \sqrt{I(t)^2 + Q(t)^2}$$

ФМ

$$\Delta\varphi(t) = arctg\left(\frac{Q(t)}{I(t)}\right)$$

ЧМ

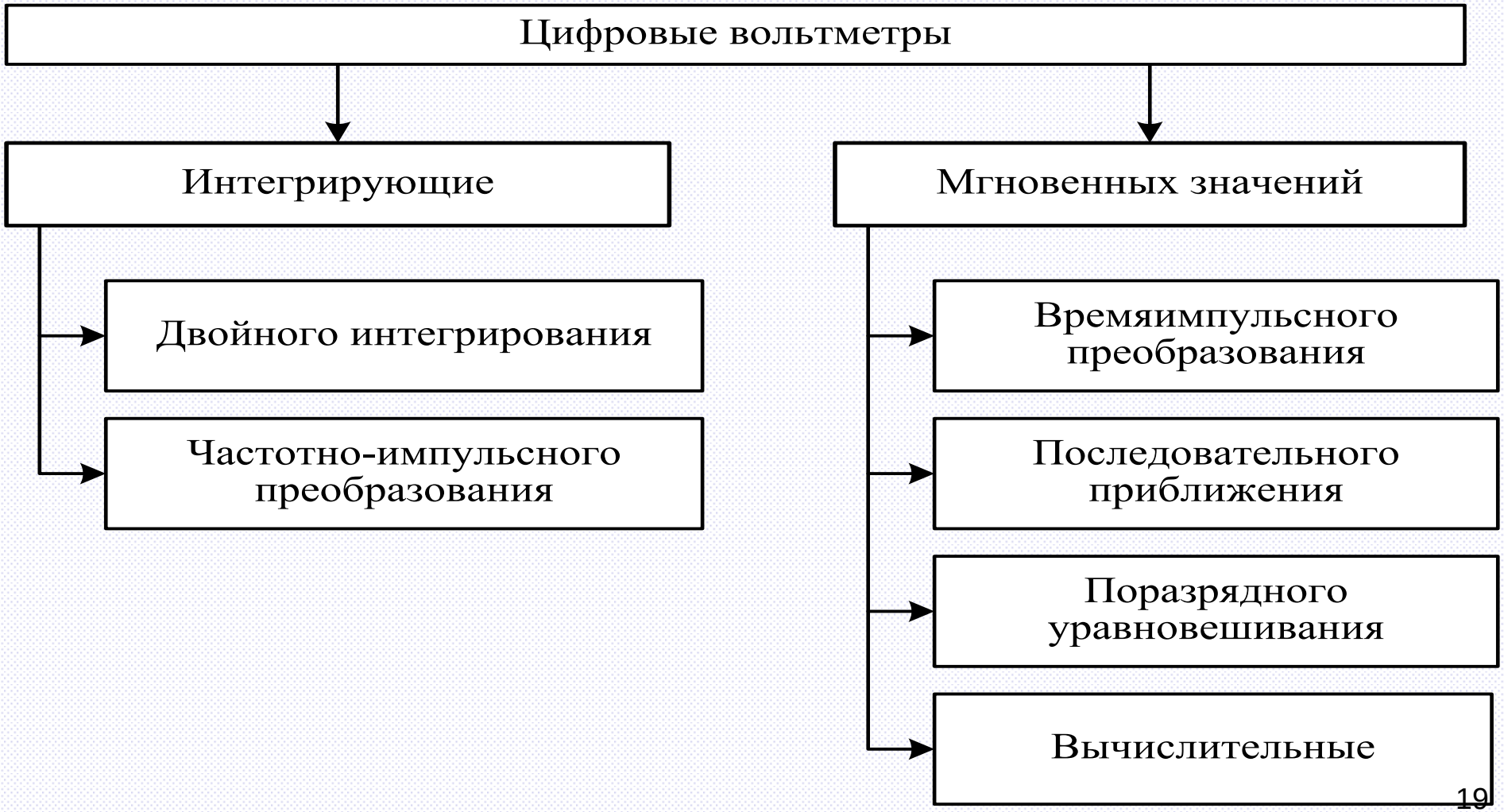
$$f(t) = \frac{\frac{d}{dt}Q(t)\cdot I(t) - \frac{d}{dt}I(t)\cdot Q(t)}{2\pi\left(I(t)^2 + Q(t)^2\right)}$$

Цифровые вольтметры (ЦВ)

ЦВ - приборы для измерения *значения* напряжения с цифровой индикацией результата.

Классификация

ЦВ по типу АЦП

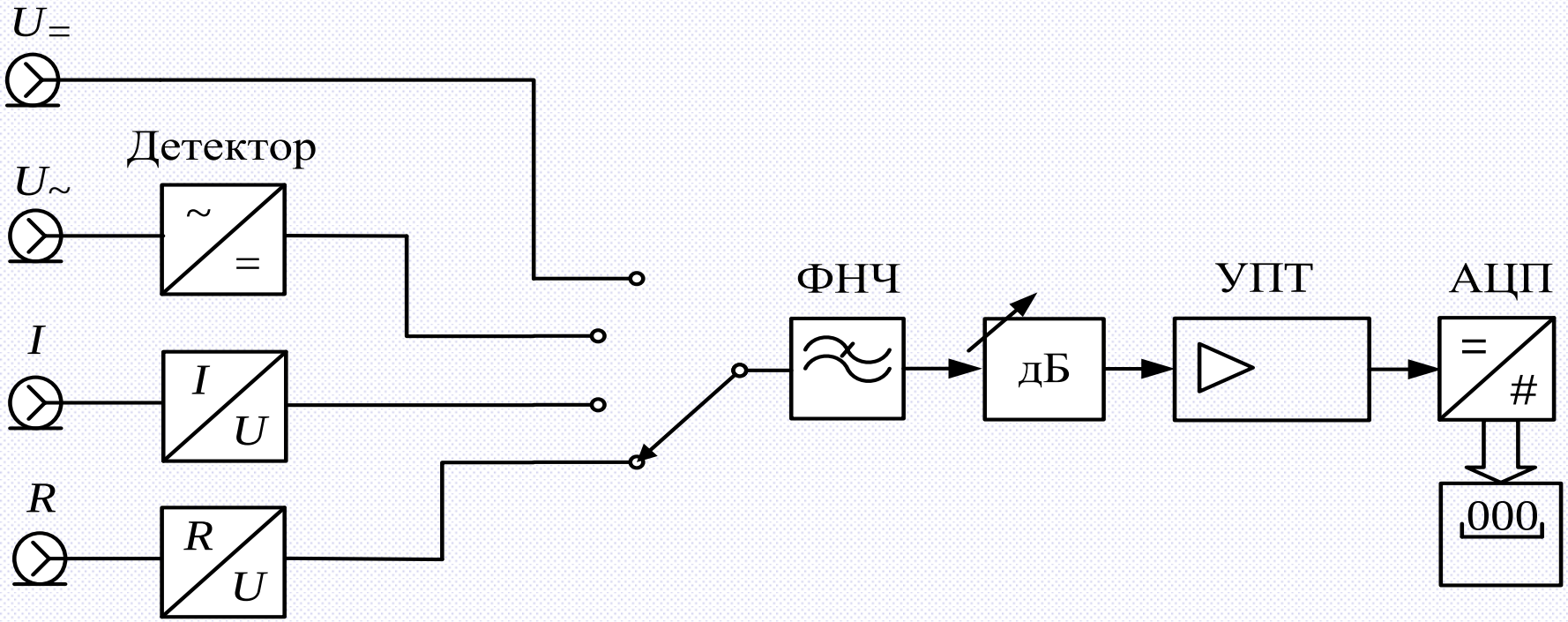


Достоинства ЦВ по сравнению с аналоговыми вольтметрами:

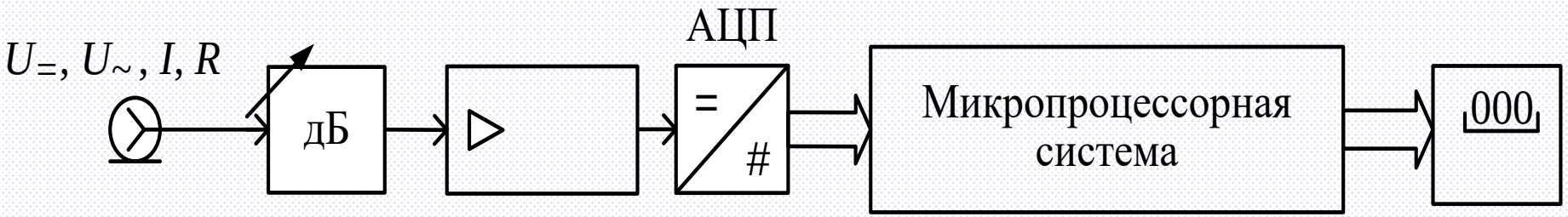
- высокая и заранее известная точность;
- широкий диапазон измерения напряжения, высокая чувствительность;
- отсутствие субъективной погрешности при отсчете результата;
- многофункциональность;
- простота автоматизации измерений;
- возможность подключения вольтметра к компьютеру, использование в измерительных системах.

К недостаткам ЦВ следует отнести относительную сложность схемы и, в ряде случаев, дороговизну, ограниченную рабочую полосу частот и небольшое быстродействие. Некоторые типы ЦВ имеют низкую помехоустойчивость. Для ряда измерительных задач (поиск максимума, настройка и пр.) отсутствие аналогового индикатора в вольтметре усложняет процесс настройки.

Структурная схема цифрового вольтметра-мультиметра



Структурная схема вычислительного цифрового вольтметра



Параметры ЦВ (кроме общих параметров аналоговых вольтметров):

разрешающая способность (шаг квантования входного напряжения). Это минимальный дискрет напряжения, которое способен различить ЦВ. Разрешающая способность задает минимальную погрешность измерения напряжения и порог чувствительности вольтметра. Обычно она соответствует единице младшего разряда результата измерения;

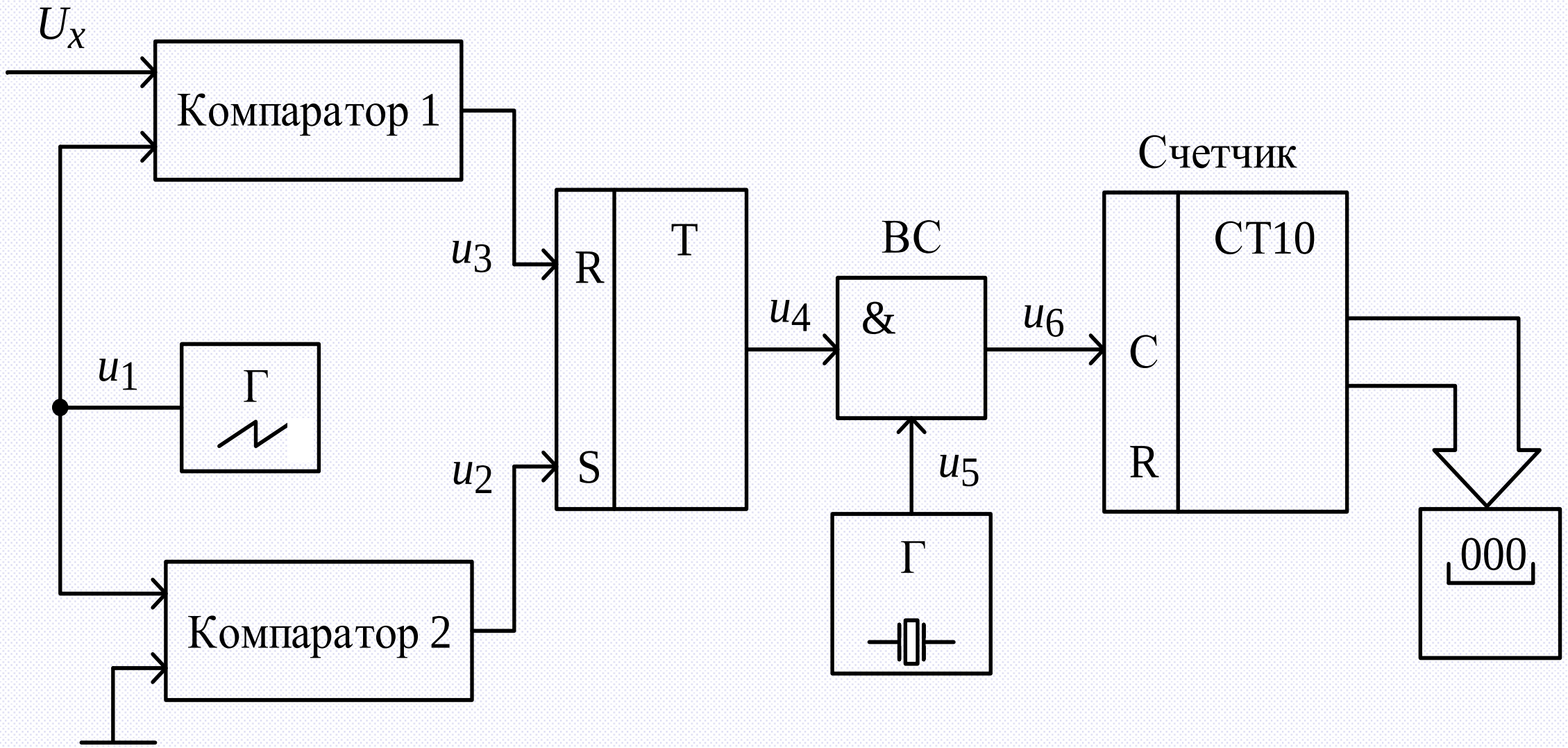
разрядность ЦВ – это число *десятичных* знаков (разрядов) на индикаторе ЦВ. Например, разрядность 4 знака соответствует показаниям вольтметра в интервале 0000…9999. Если старший разряд *неполный*, то говорят о *дробной* разрядности вольтметра. Числитель дроби показывает *максимальное* значение, которое он может принимать, а знаменатель - *число* возможных состояний. Если неполный разряд ½, то единица - это максимальное значение, которое он может принимать, а двойка - число возможных состояний (0 или 1). Для ¾ максимальное значение 3 и четыре возможных состояния (0, 1, 2 или 3).

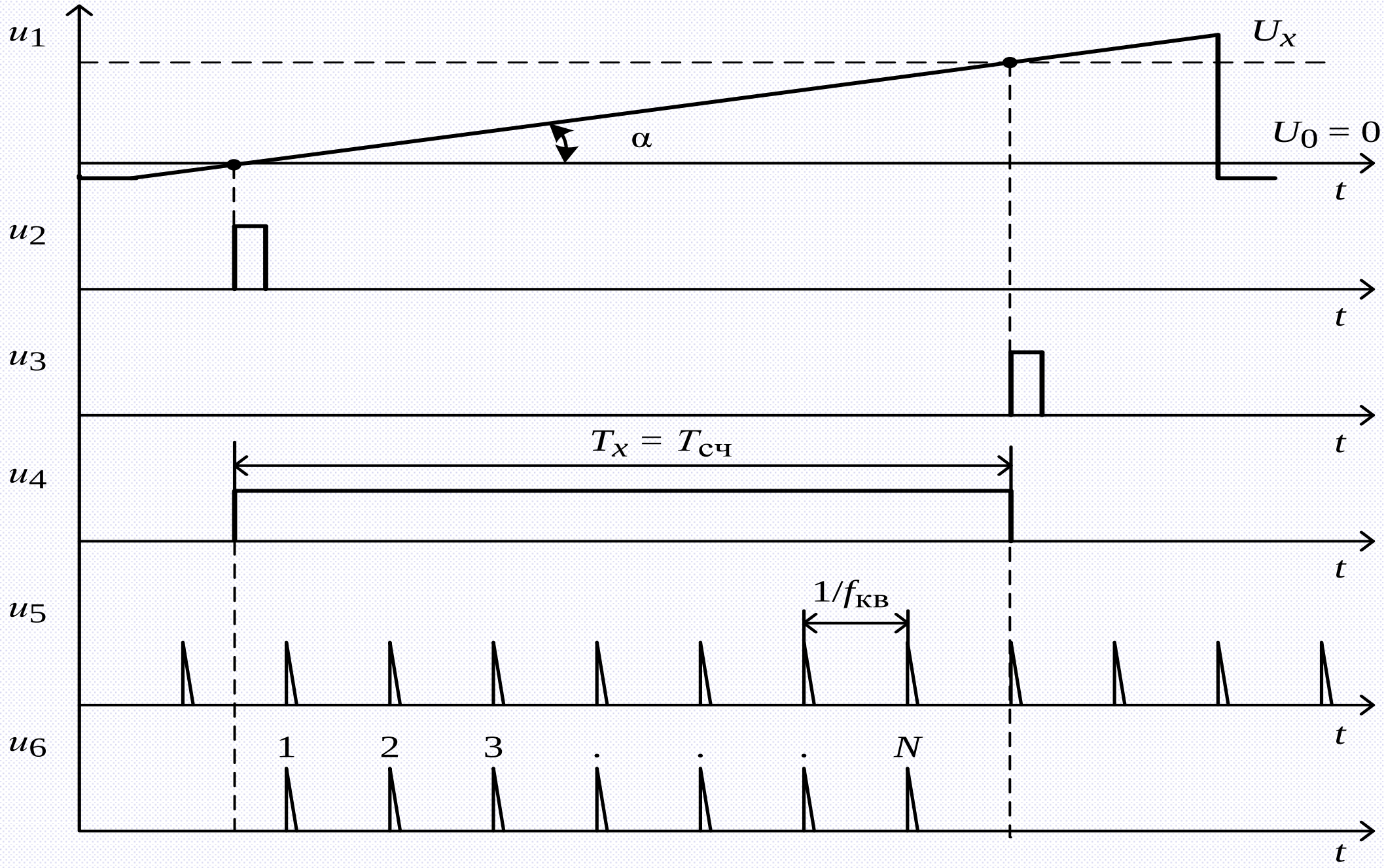
Предел допускаемой основной и дополнительной погрешностей для ЦВ, согласно ГОСТ 14014–94 указывают в стандартном виде:

$$\delta = \pm\left(c + d\left(\frac{U_{\max}}{U_x} - 1 \right) \right), \% \quad \text{или} \quad \delta = \pm\left(c' + d\left(\frac{U_{\max}}{U_x} \right) \right), \%$$

Формула для погрешности включает мультипликативную и аддитивную части и учитывает как погрешности квантования, так и инструментальные погрешности АЦП (нелинейность преобразования, смещение нуля) и других блоков вольтметра.

АЦП времяимпульсного преобразования




u_1
U_x
$U_0 = 0$
α
t
u_2
t
u_3
t
$T_x = T_{сч}$
u_4
t
$1/f_{кв}$
u_5
t
u_6
1
2
3
.
.
.
N
t

Вольтметры данного типа используют АЦП, осуществляющее преобразования

«напряжение => временной интервал => код».

Принцип действия – сравнение Ux с эталонным линейно нарастающим напряжением u1 (калиброванный угол наклона α)

Длительность импульса u4 прямо пропорциональна измеряемому напряжению и обратно пропорциональна тангенсу угла наклона линейно-нарастающего напряжения. Она измеряется методом дискретного счета:

$$T_x = \left(\frac{U_x}{\operatorname{tg}\,\alpha} \right) \qquad N \cong T_x f_{\text{кв}} = \frac{U_x}{\operatorname{tg}\,\alpha} f_{\text{кв}}$$

Выбираем частоту кварцевого генератора и тангенс угла наклона напряжения так, чтобы их отношение было кратно 10

$$\frac{f_{\text{кв}}}{\operatorname{tg}\,\alpha} = 10^k,\ k = 0, 1, 2... \quad \Rightarrow \quad N \cong 10^k U_x$$

Число импульсов на индикаторе численно совпадает с измеряемым напряжением (с кратностью 10)

Основными составляющими погрешности АЦП такого типа являются:

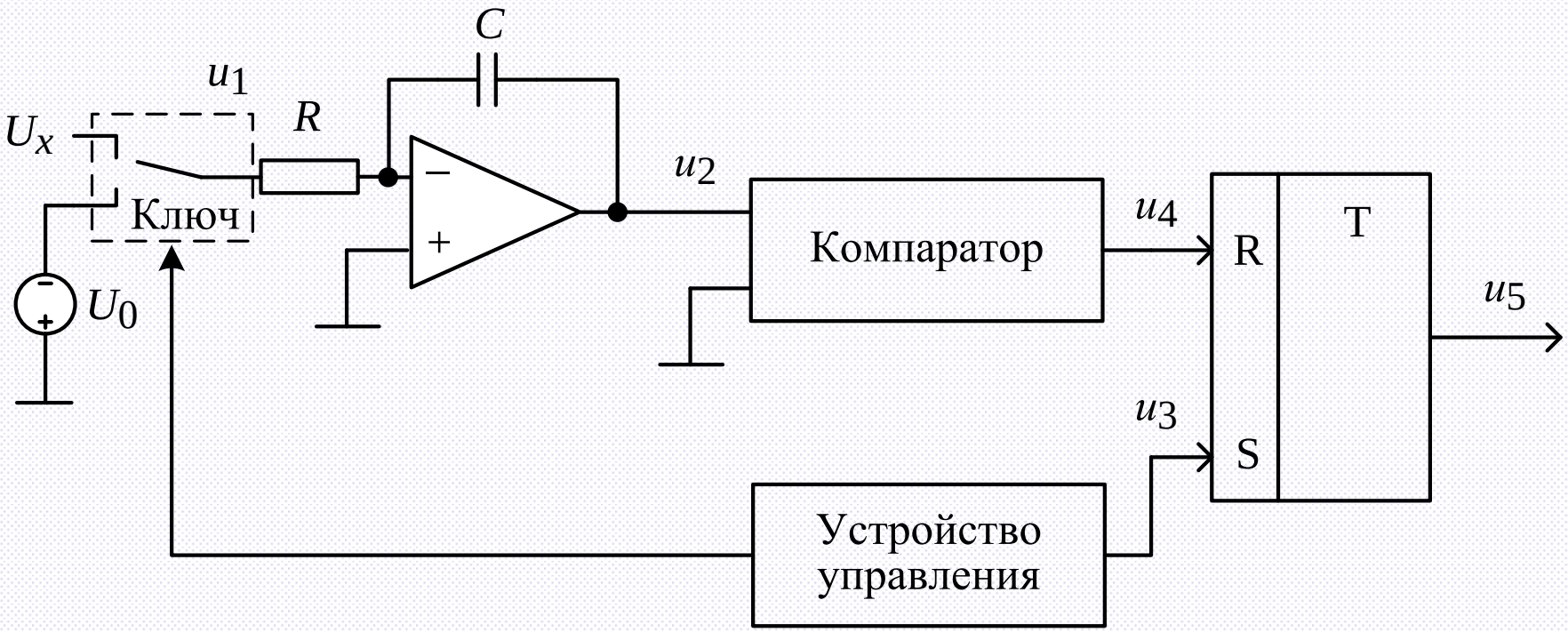
- непостоянство наклона и нелинейность напряжения генератора ЛИН;
- погрешности сравнения напряжений в компараторах;
- нестабильность кварцевого генератора счетных импульсов;
- погрешность дискретности.

Кроме того, на точность измерения напряжения влияют погрешности установки аттенюатора и нестабильность коэффициента передачи УПТ.

ЦВ данного типа измеряют **мгновенное значение** напряжения. Помехи, попадающие на вход прибора, влияют на его показания.

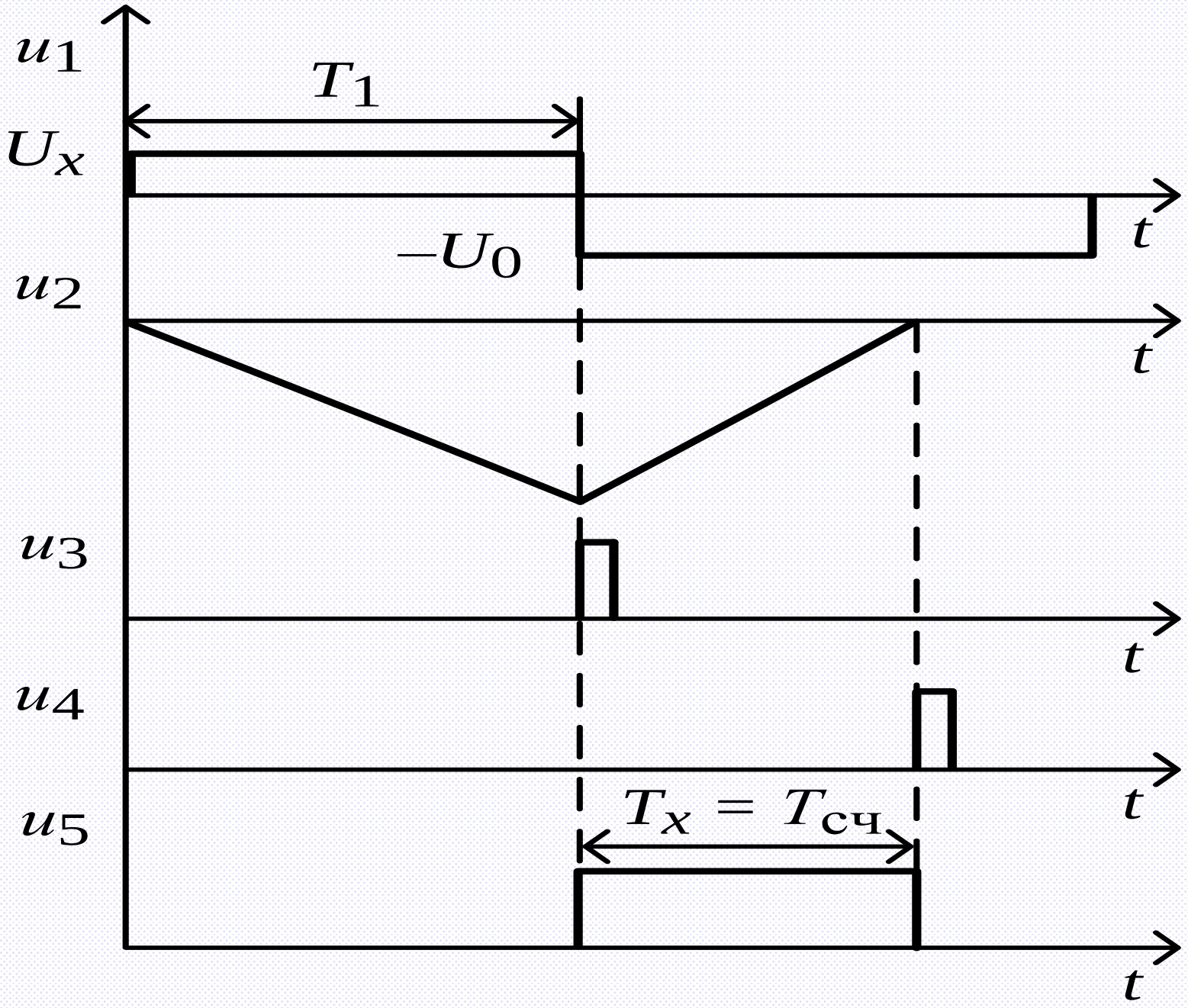
Вольтметры времяимпульсного преобразования просты и дешевы, имеют достаточно высокую точность. Основной их недостаток – низкая помехоустойчивость.

АЦП двойного интегрирования



Основа АЦП - интегратор. Это функциональный блок на операционном усилителе, обеспечивающий связь между входным u1 и u2 напряжениями в виде интеграла

$$u_{\text{вых}}(t) = -\frac{1}{RC}\int_0^t u_{\text{вх}}(t)dt$$



Интегрирование постоянного напряжения на входе интегратора u1 дает линейно-нарастающее (или линейно-спадающее) напряжение u2 на его выходе.

$$T_1 = \frac{n}{f_{кв}}$$

Выбирают тактовую частоту такой, чтобы время первого интегирования $T1$ было бы равным или кратным периоду промышленной сети 20мс

$$u_{вых}(T_1) = -\frac{1}{RC}\int_0^{T_1} u_{вх}(t)\,dt = -\frac{\overline{U_x}}{RC}\cdot\frac{n}{f_{кв}}$$

$$u_{вых}(T_1 + T_x) = -\frac{\overline{U_x}\,n}{RC\,f_{кв}} + \frac{1}{RC}\int_{T1}^{T_1+T_x} U_0\,dt = 0$$

$$T_x = T_{сч} = \frac{\overline{U_x}}{U_0}\cdot\frac{n}{f_{кв}}$$

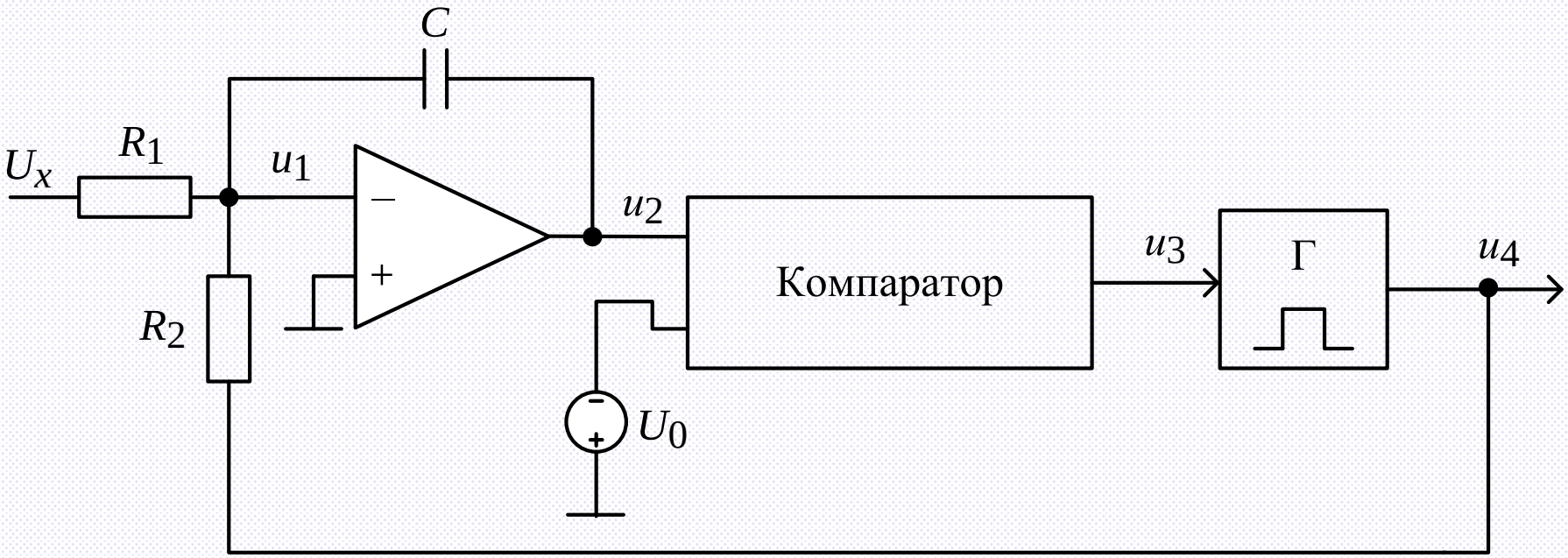
$$N \cong T_x f_{кв} = \frac{\overline{U_x}\,n}{U_0} = 10^k\,\overline{U_x}$$

Основные составляющие погрешности АЦП двойного интегрирования:

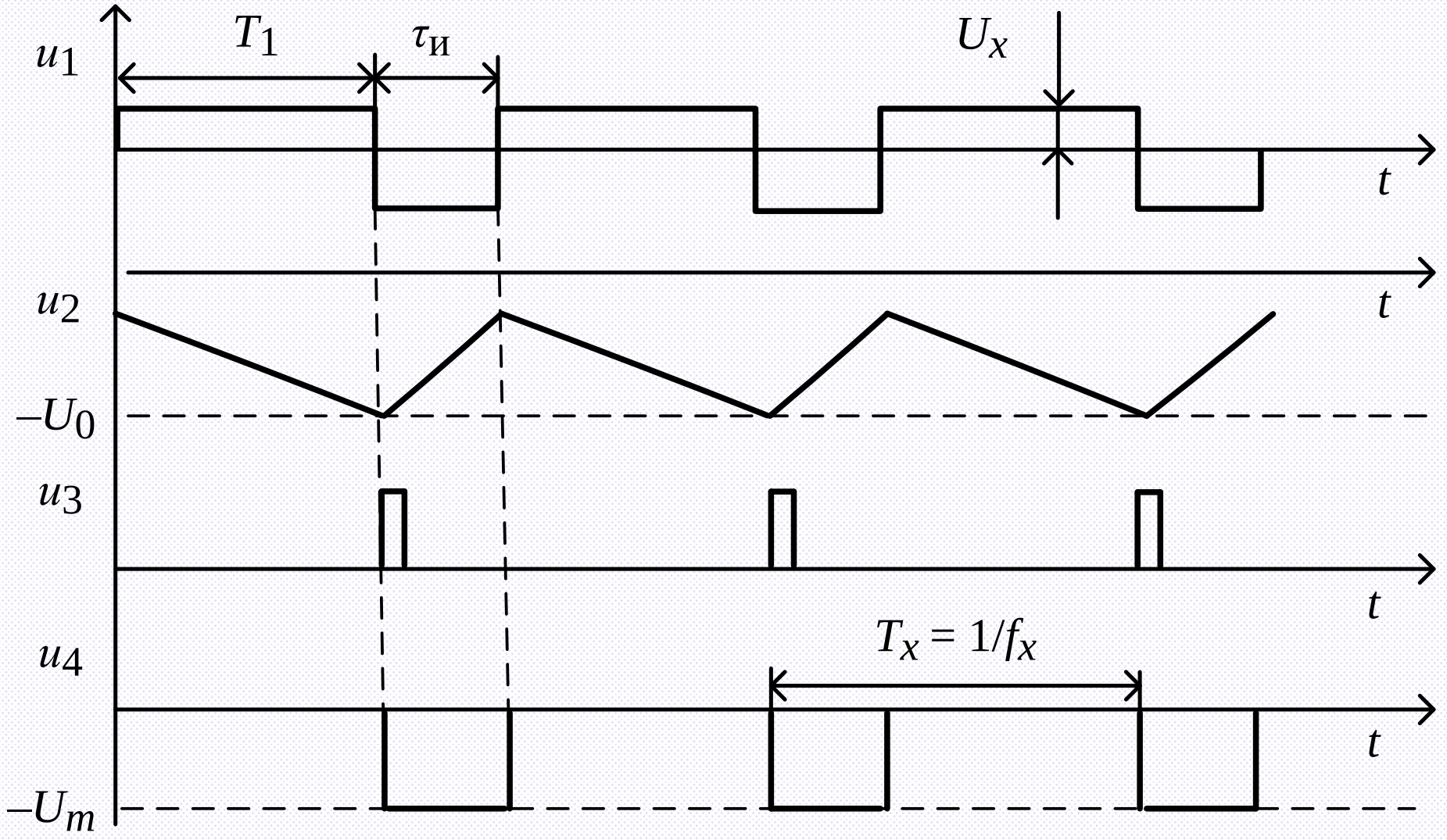
- погрешность установки опорного напряжения и его нестабильность;
- погрешность интегратора, проявляющаяся в нелинейности напряжения на его выходе;
- погрешность сравнения напряжений в компараторе;
- погрешность дискретности при измерении длительности *Tx*.

Вольтметры двойного интегрирования – наиболее популярная разновидность цифровых вольтметров и мультиметров. Основные их достоинства – простота, высокая помехоустойчивость при достаточной точности.

АЦП с преобразованием напряжения в частоту



Используется преобразователь «напряжение–частота» (ПНЧ). В ПНЧ осуществляется интегрирование **суммы** u_1 положительного входного напряжения и отрицательных эталонных прямоугольных импульсов u_4 образцовой амплитуды U_m. Линейно нарастающее и убывающее напряжение u_2 на выходе интегратора сравнивают с опорным напряжением U_0. Частота выходных импульсов зависит от U_x


u_1
T_1
$\tau_и$
U_x
t
u_2
t
$-U_0$
u_3
t
u_4
$T_x = 1/f_x$
t
$-U_m$

$$u_2(T_1) = u_2(0) - \frac{\overline{U_x}}{R_1 C} T_1 \qquad u_2(T_1 + \tau_и) = u_2(T_1) + \left(\frac{U_m}{R_2 C} - \frac{\overline{U_x}}{R_1 C} \right) \tau_и$$

Условие завершения цикла

$$u_2(T_1 + \tau_и) = u_2(0) \quad \Rightarrow \quad \frac{\overline{U_x}}{R_1 C}(T_1 + \tau_и) = \left(\frac{U_m}{R_2 C} \right) \tau_и$$

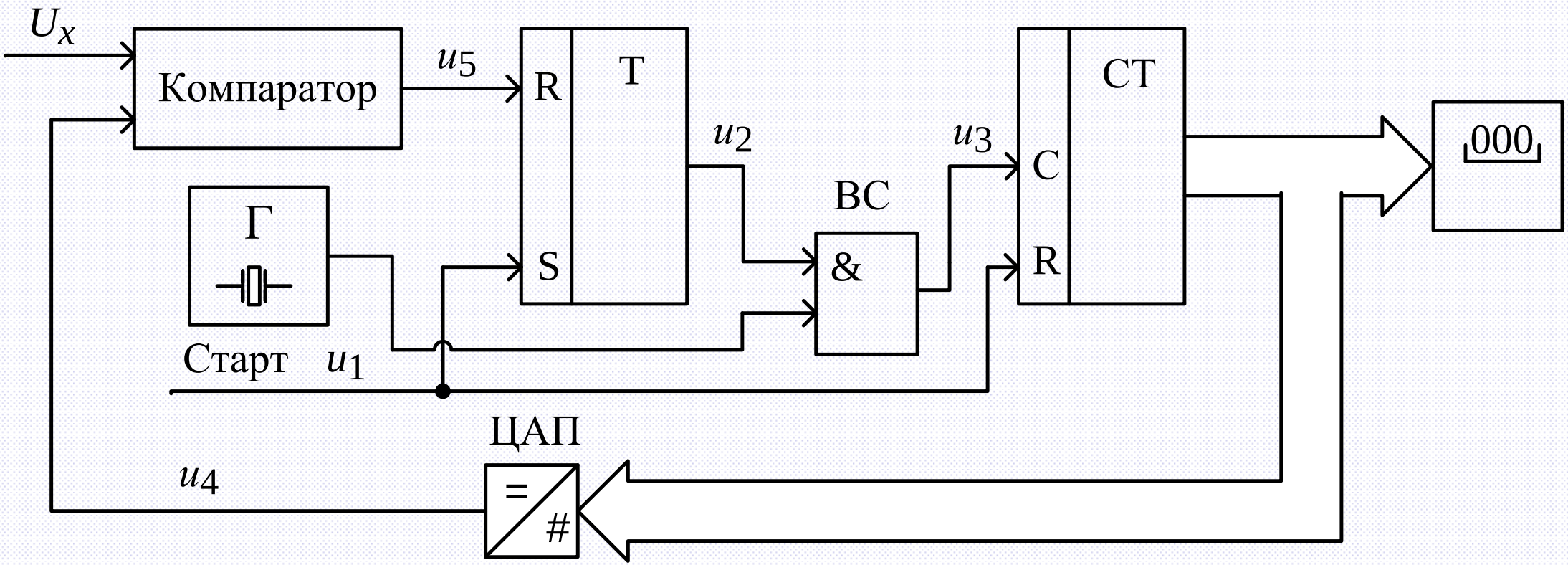
$$\Rightarrow \quad f_x = \frac{1}{T_1 + \tau_и} = \frac{\overline{U_x} R_2}{R_1 U_m \tau_и}$$

$\tau_и$

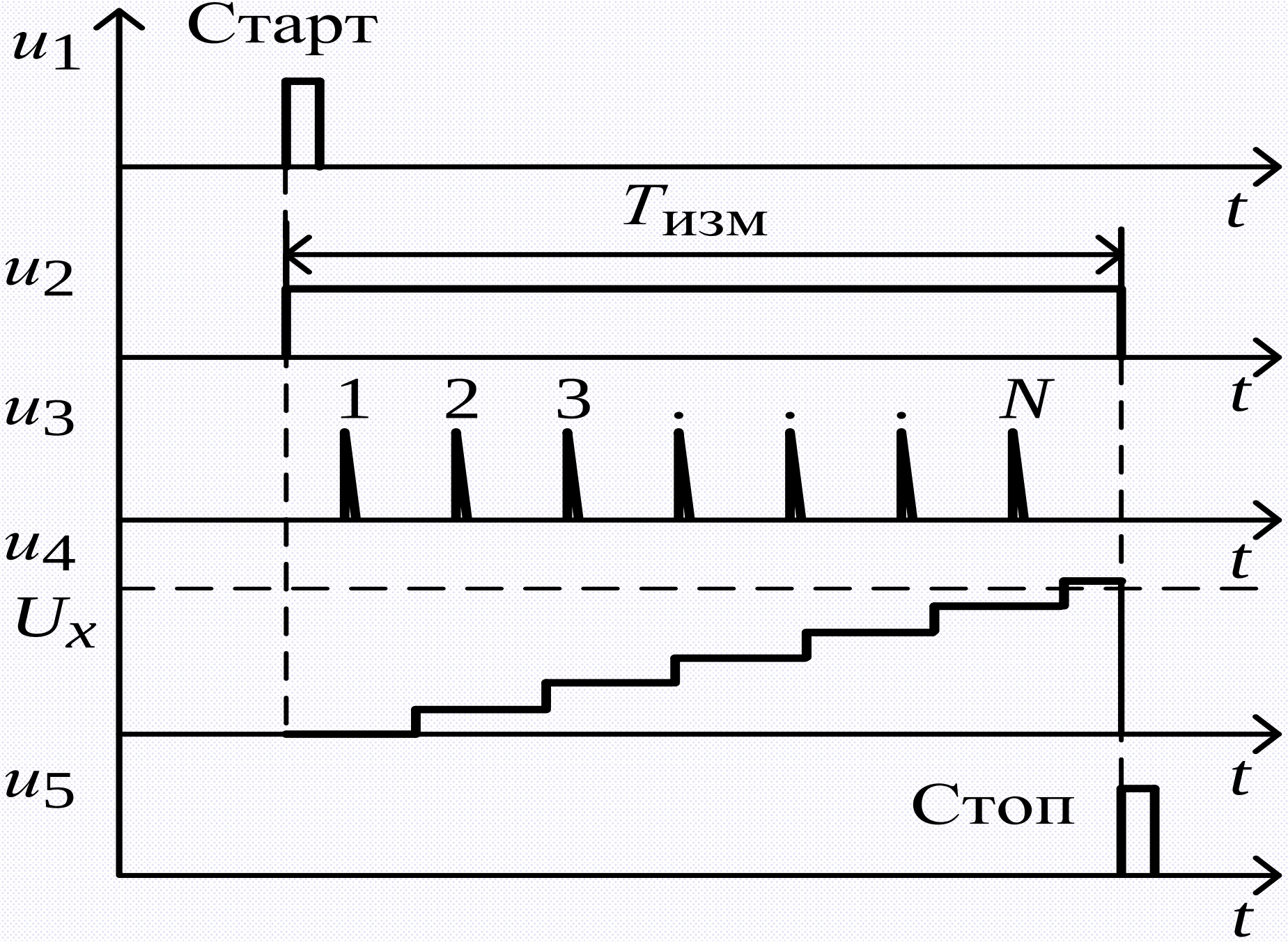
Частоту выходных импульсов преобразователя измеряют методом дискретного счета. Данный АЦП интегрирующего типа. Обладает хорошей помехоустойчивостью.
Точность преобразования определяется:

- стабильностью параметров импульса одновибратора U_m и $\tau_и$;
- точностью установки отношения резисторов интегратора $R1$ и $R2$;
- погрешностью компаратора;
- погрешностью дискретности частотомера.

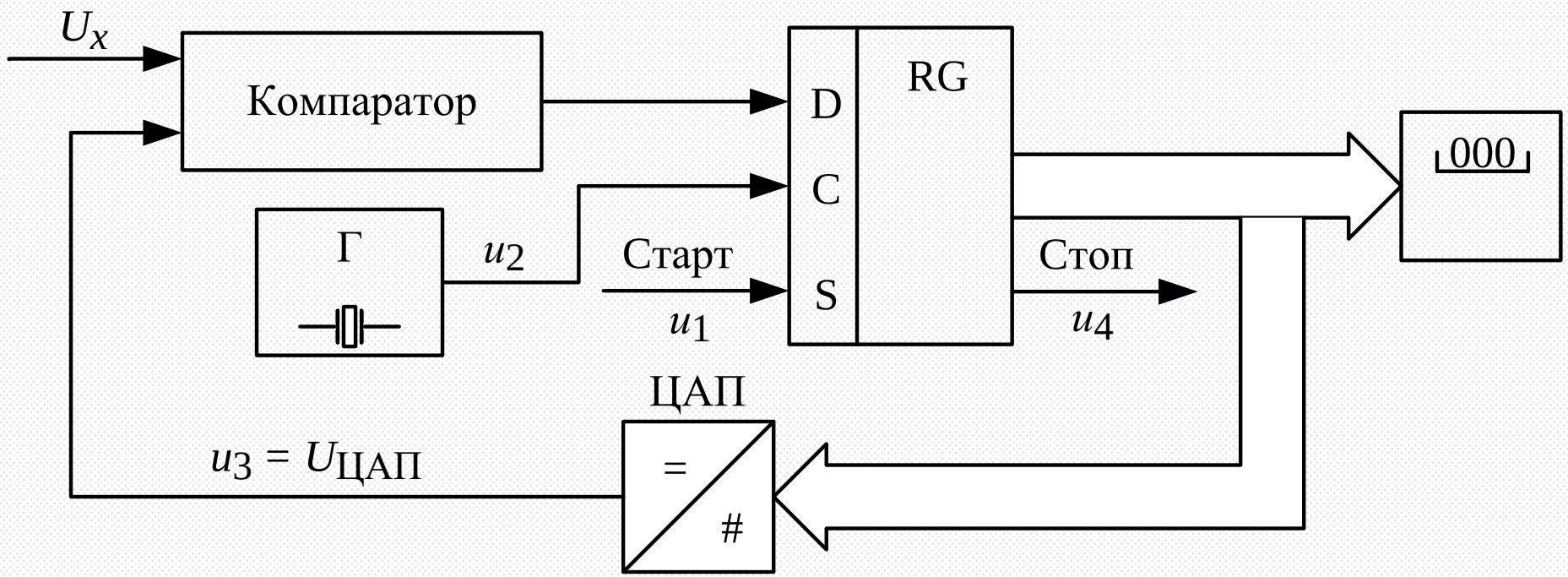
АЦП последовательного счета



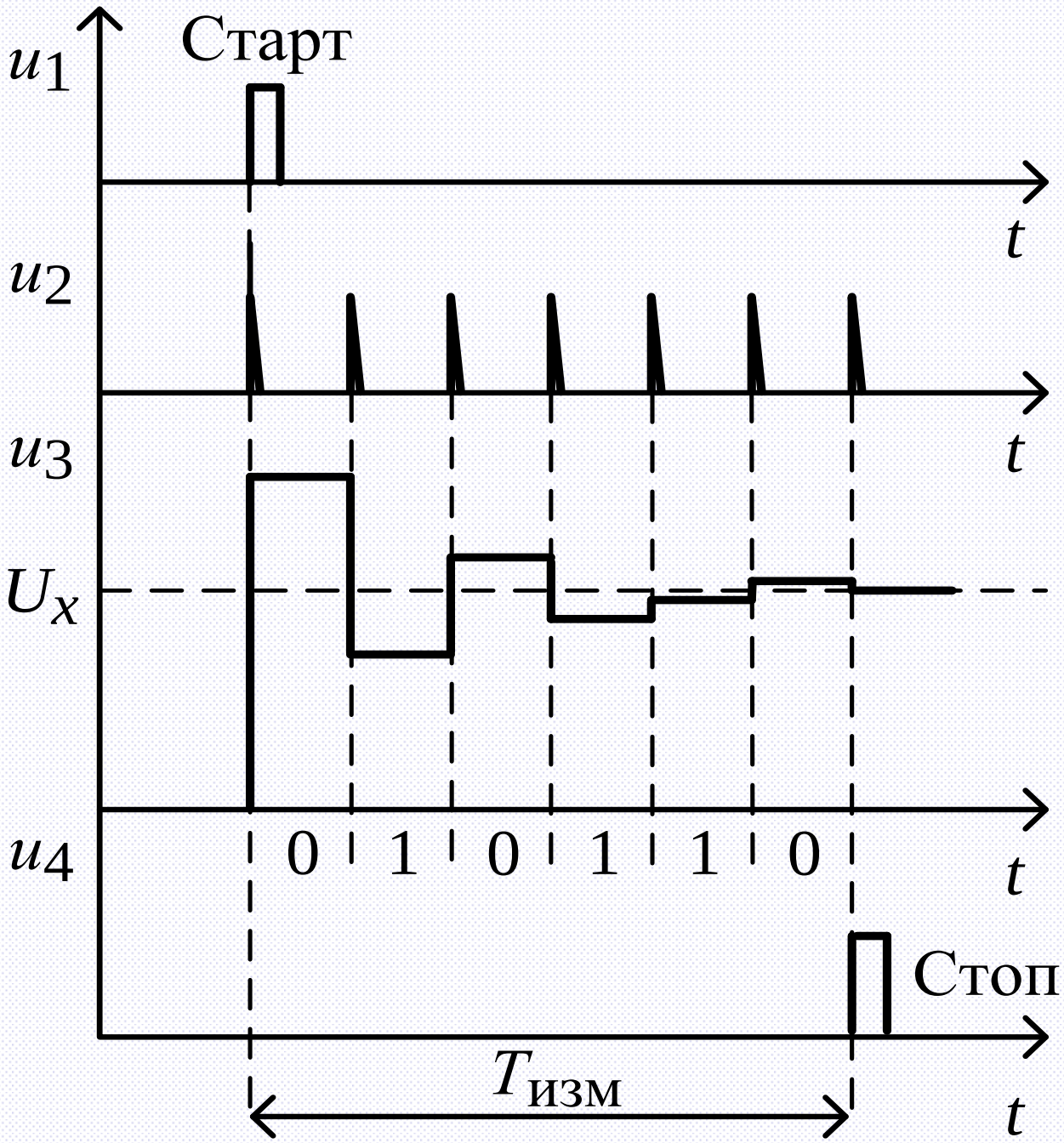
Последовательный АЦП состоит из компаратора, двоичного счетчика и цифроаналогового преобразователя (ЦАП), включенного в цепь обратной связи. Количество подсчитанных импульсов пропорционально измеряемому напряжению. Время измерения непостоянно.


u_1
Старт
t
$T_{изм}$
u_2
t
u_3
1
2
3
N
t
u_4
t
U_x
t
u_5
Стоп
t

АЦП последовательного приближения



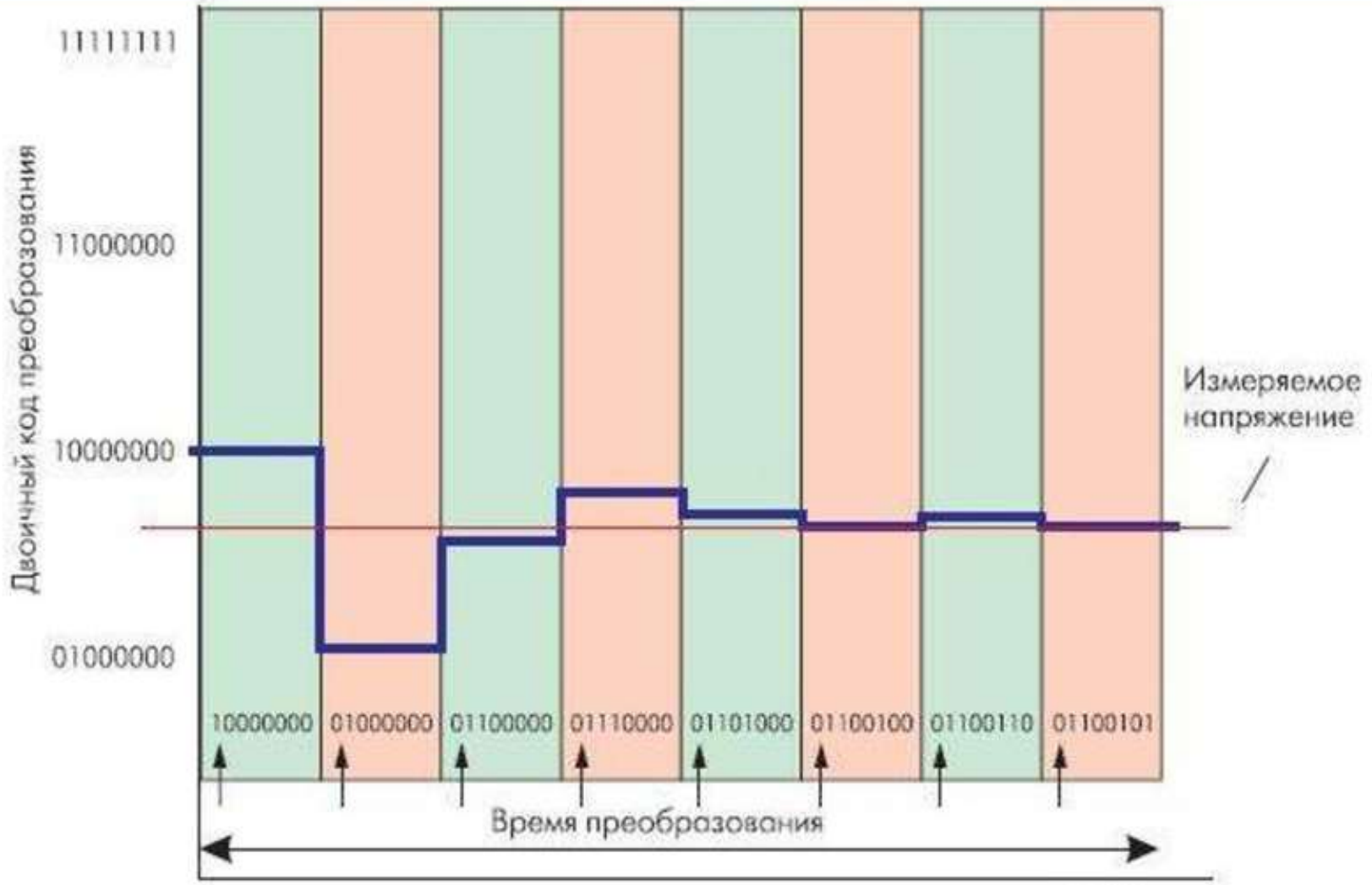
Принцип АЦП -> последовательное сравнение измеряемого напряжения с 1/2, 1/4, 1/8 ….. опорного напряжения. Для *N*-разрядного АЦП последовательного приближения весь процесс занимает *N* последовательных шагов (итераций) вместо 2^N-1 при использовании АЦП последовательного счета



Быстродействие АЦП данного типа определяется выбранной разрядностью и суммой времени установления ЦАП, переключения компаратора и задержки распространения сигнала в регистре последовательного приближения.

АЦП последовательного приближения

Процесс преобразования аналог-цифра в 8-битном АЦП последовательного приближения



Вычислительные цифровые мультиметры

Применение быстродействующих АЦП для мультиметров сделали возможным переход от использования метода аналогового преобразователя среднеквадратических значений (RMS) к использованию метода прямой дискретизации.

При использовании метода прямой дискретизации входной сигнал оцифровывается при фиксированной частоте дискретизации. Захватывается несколько циклов входного сигнала. Далее оцифрованные выборки возводятся в квадрат, усредняются, и из них извлекается квадратный корень для получения RMS



Agilent 34410A - вычислительный мультиметр.

Базовая погрешность ± 0,003 %, 6½ разрядов. Основная погрешность измерения напряжения постоянного тока 30 х 10^{-6} за год. Пределы измерений переменного тока 100 мВ/ 1 В/10 В/100 В/750 В. Разрешение 0,1мкВ/1мкВ /10мкВ/ 100мкВ/1мВ . Частотный диапазон 3 Гц … 300 кГц. Скорость измерений до 10 000 в сек.

Схемы преобразования сигнала в вольтметрах среднеквадратического значения

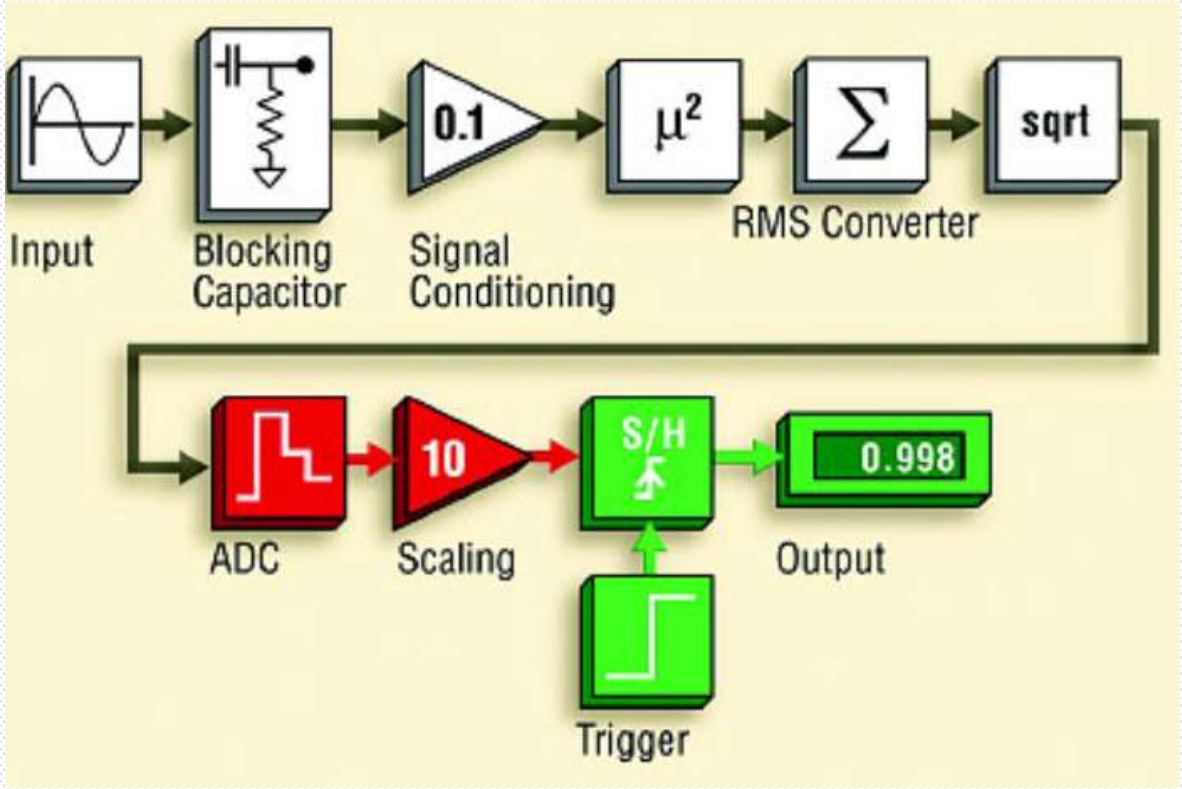


Схема измерения напряжения сигнала с **аналоговым** преобразованием RMS..

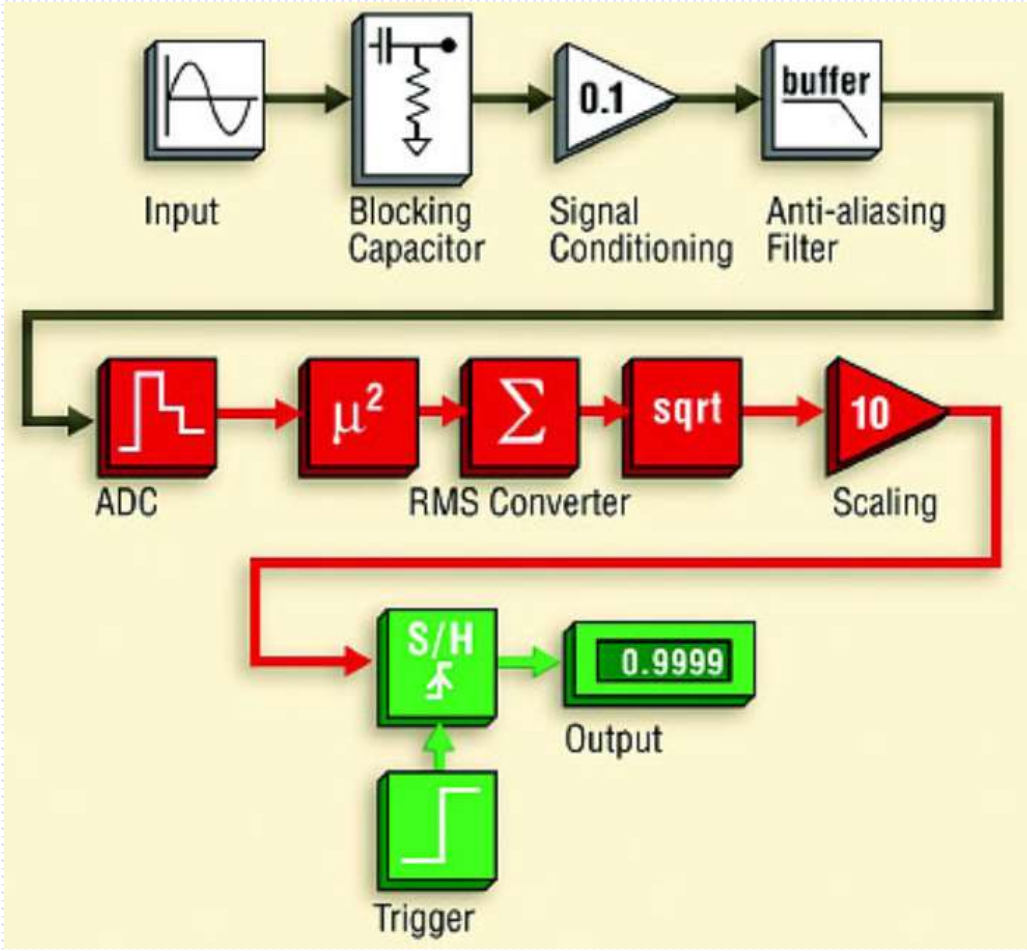


Схема измерения напряжения сигнала с модулем **цифровой** оценки RMS.

Цифровой 6 ½-разрядный мультиметр В7-78



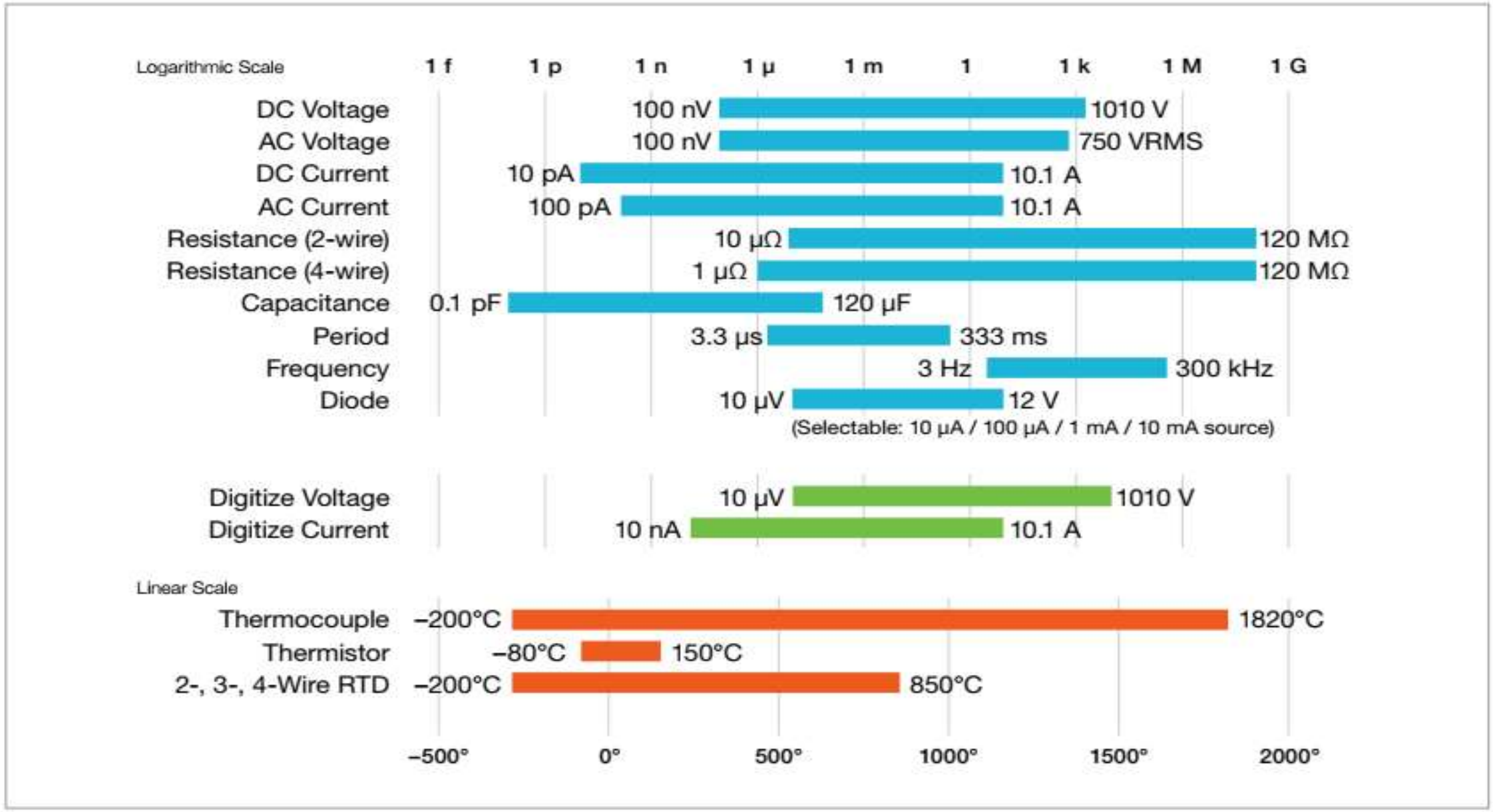
Производство компании JUNG JIN из Южной Кореи (торговая марка АКИП). Близкий аналог мультиметра HP-34401A (Agilent Technologies).

Класс точности (0.05+ 0.0035Umax/ Ux) ,%

Цифровой мультиметр с графическим сенсорным дисплеем, 6.5 разрядов фирмы KEITHLEY (Tektronix) DMM6500



DMM6500 Measurement Capabilities



DMM6500 15 measurement functions and ranges.

Цифровые мультиметры



3 ½ разряда
Max 1999



3 ¾ разряда
Max 3999



3 5/6 разряда
Max 5999



4 разряда
Max 9999



3 ¾ разряда Max 3999 настольный вариант



Мультиметр-щуп

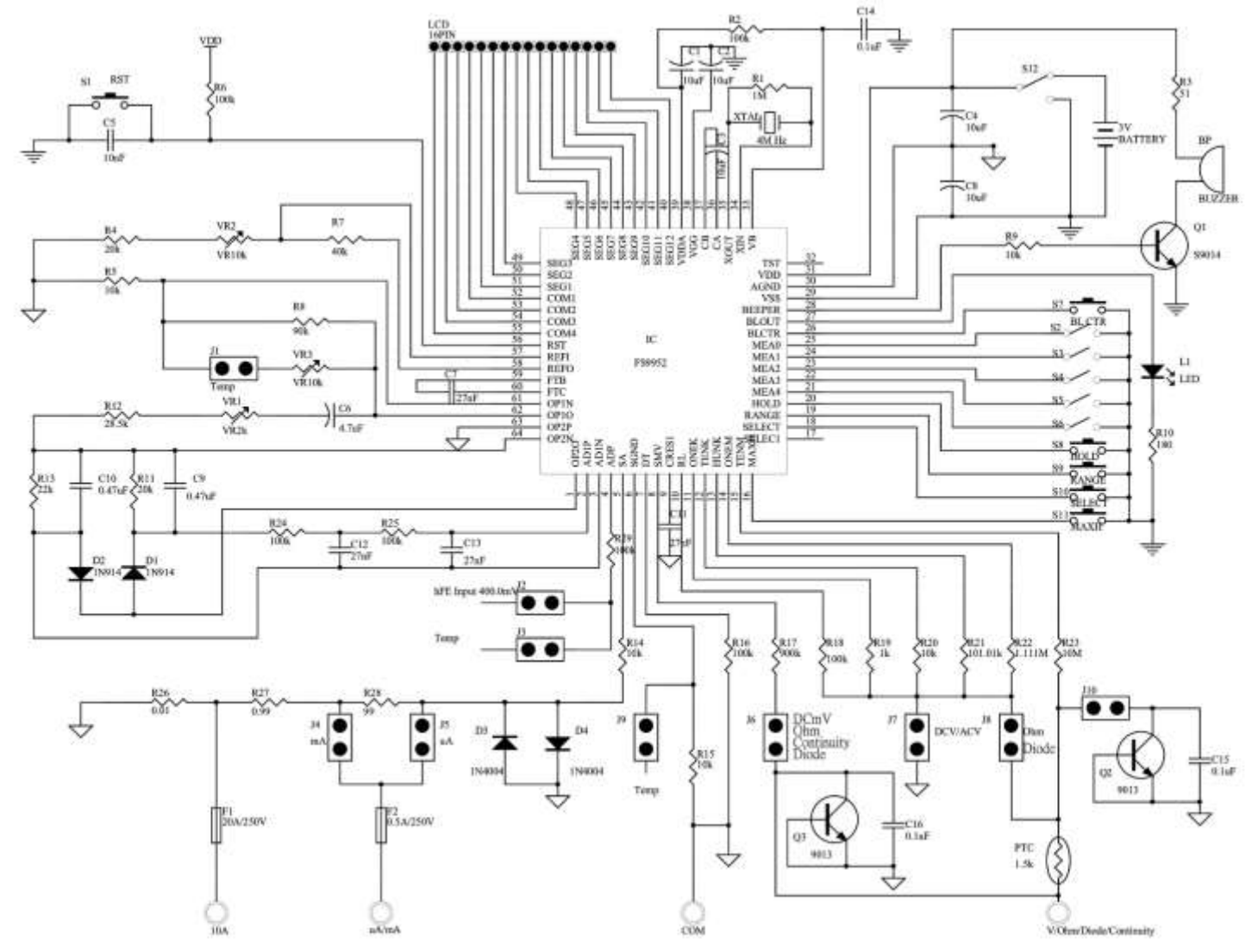


Щитовой вариант

Цифровой 3½ мультиметр-щуп MS-8211D



Цифровой 3½ мультиметр MS-8211D (схема)



Параметр	Значение
U=	Пределы 200мВ…600 В ±(0,7%+2)
U≈	Пределы 200мВ…200 кОм ±(1%+3)
R	Пределы 200Ом…600 В ±(1%+3)
I=, I≈	Пределы 20мА…200 мА ±(2%+3)
ТТЛ логика	0-зел.диод, 1 – красный диод
Диоды	1.5 В, 1 мА

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!



СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
**«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)**

Факультет радиотехники и телекоммуникаций

Кафедра Теоретических основ радиотехники

http://kepstr.eltech.ru/tor/ptri

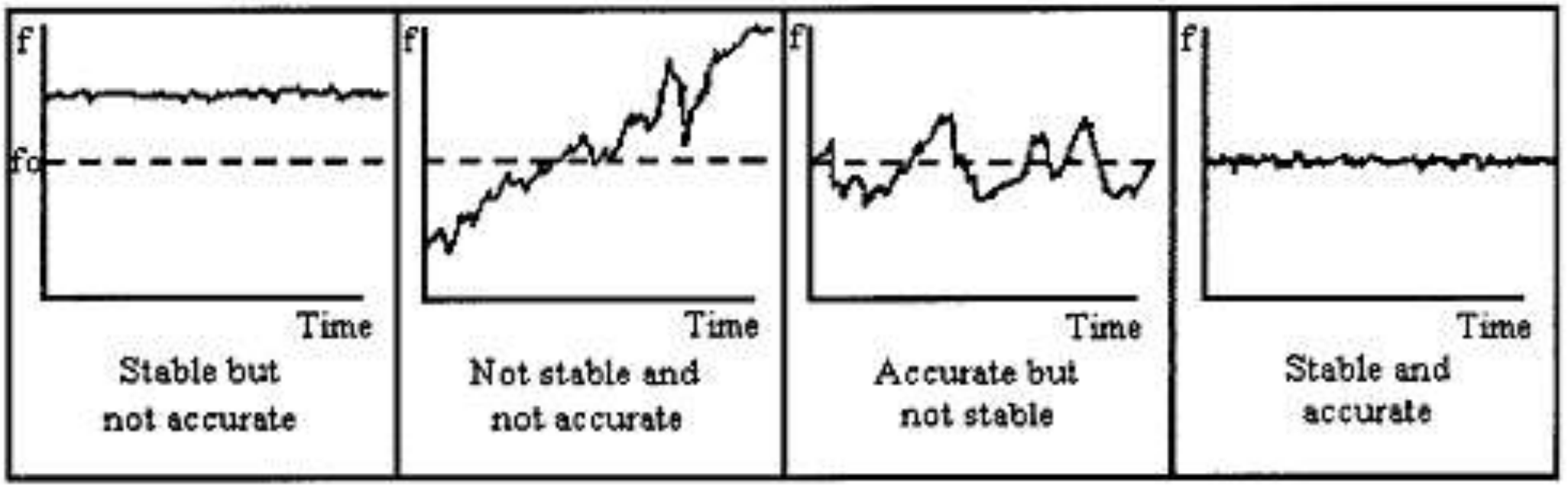
А.А. Данилин

«Приборы и техника радиоизмерений» (электронный конспект лекций)

Измерение частоты и фазового сдвига. Цифровые частотомеры и фазометры

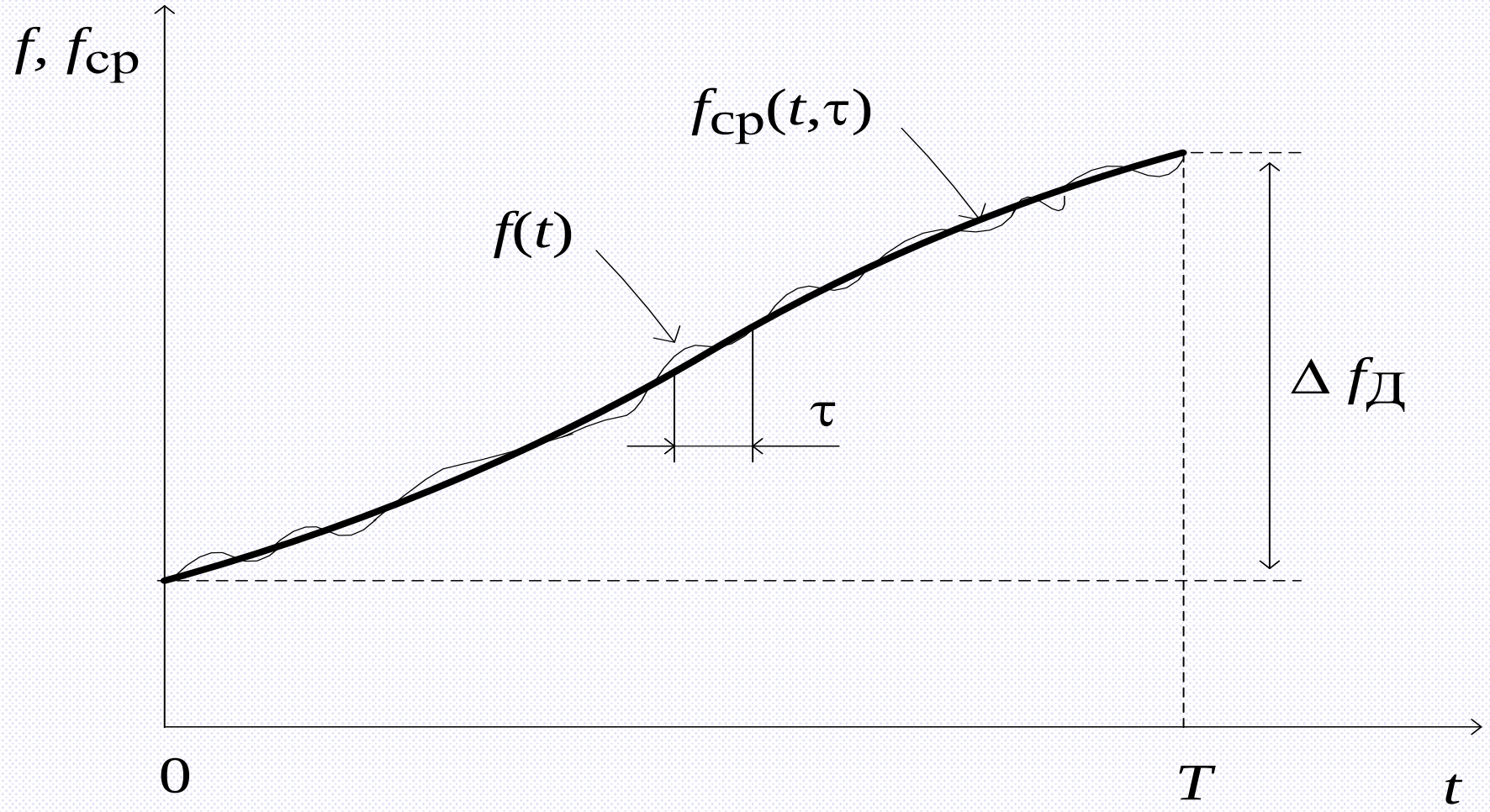
**Санкт-Петербург
2024 г.**

Классификация методов и средств измерения частоты



Временные зависимости частоты источника реального квазипериодического сигнала

Временная зависимость частоты радиосигнала



Мгновенная частота радиосигнала $$f(t) = \frac{1}{2\pi}\frac{d\Phi}{dt} = f + \frac{1}{2\pi}\frac{d\varphi(t)}{dt}$$

Основные задачи частотных измерений:

- оценка мгновенной частоты в заданный момент времени;
- определение средней частоты сигнала за заданный интервал времени,
- измерение нестабильности частоты;
- измерение частоты заполнения

Кратковременная нестабильность – *быстрая* флуктуация частоты в течении небольшого отрезка времени τ (доли- единицы сек)

Долговременная нестабильность – *медленный* уход частоты в интервале времени T (минуты, часы, дни, месяцы , годы). Так как измерение частоты занимает некоторое время *T*изм, то рекомендуется выполнять заранее оговоренные соотношения между *T* и *T*изм (например 1 сутки – 1 час, 100 с – 1 с и пр.).

Эталоны и меры частоты

Группа государственных стандартов частоты – ***рубидиевый, цезиевый и водородный*** стандарты частоты со средней нестабильностью частоты за год до $\approx 5 \cdot 10^{-14}$

Привязка рабочих средств измерений к эталонам-

измерительные приемники сигналов эталонных частот (приборы вида Ч1),

компараторы и преобразователи частот, передаваемых радиостанциями Государственной службы частот и времени (вид Ч7).

Эти приемники работают в диапазоне сверхдлинных волн (с частотами в пределах 10 – 29,9 кГц с дискретностью 100 Гц, 66.6 кГц, 100 кГц и 200 кГц), на коротких волнах в диапазоне 2496…30004 кГц с дискретом 4 кГц, на радиовещательных частотах, на которых передают сигналы точного времени.

Точность сличения частот не хуже $10^{-9} - 10^{-11}$

Рабочие меры частоты

Кварцевые генераторы – обеспечивают относительный уход частоты до 10^{-8} **за сутки** и до $5*10^{-7}$ **за год** эксплуатации..

Кратковременная нестабильность может быть порядка 10^{-9} … 10^{-10}.

Используют герметизацию кварцевого резонатора и его термостатирование.

Наиболее часто используют кварцевые резонаторы с собственной частотой порядка нескольких мегагерц (типовые значения 0.1, 1 и 5 МГц).

Для получения более высоких эталонных частот применяют умножение частоты кварцевого генератора. Используют также возбуждение кварца на его высших гармониках (со 2-й до 9-й), на которых добротность кварца больше.

Методы измерения частоты радиосигналов



Метод дискретного счета (цифровые частотомеры)

Принцип измерения частоты: подсчет за известный (образцовый) интервал времени *T*сч числа импульсов *N*, сформированных из входного сигнала. Тогда частота *fx* (ее среднее значение за время *T*сч) определяется отношением

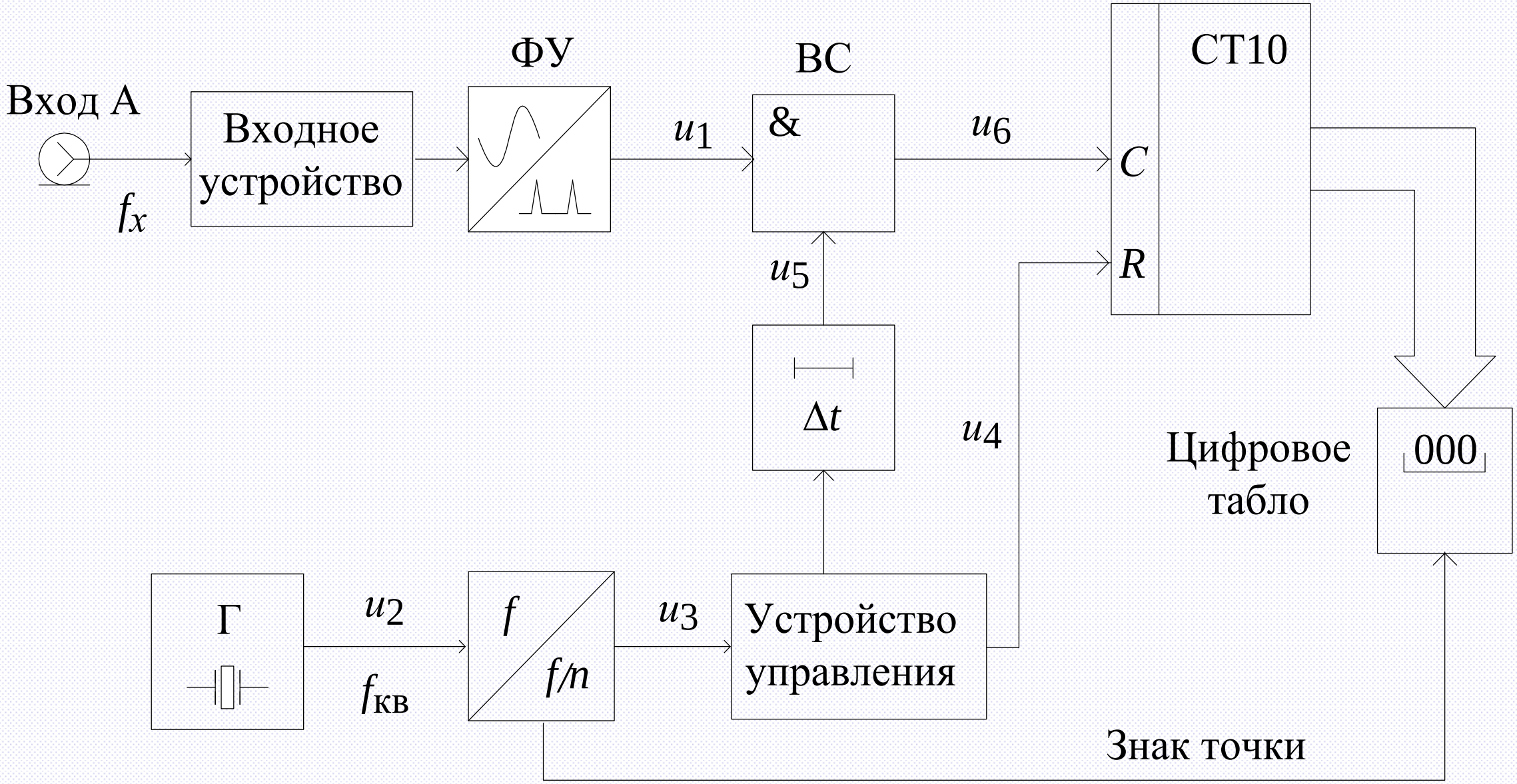
$$f_x \approx \frac{N}{T_{\text{сч}}}$$

Метод дискретного счета является разновидностью *метода сравнения.* Результат показывает, во сколько раз неизвестная частота больше образцовой частоты $f_{\text{обр}} = \frac{1}{T_{\text{сч}}}$

Приборы, основанные на методе дискретного счета, называют ***электронно-счетными частотомерами*** (ЭСЧ, *electronic counters*). Они применяются для измерения

- Частоты;
- Периода и временных интервалов;
- Отношения частот;
- Количества импульсов и количества оборотов (тахометры);
- Фазового сдвига.

ЭСЧ в режиме измерения частоты - метод «прямого счета» (direct counting).



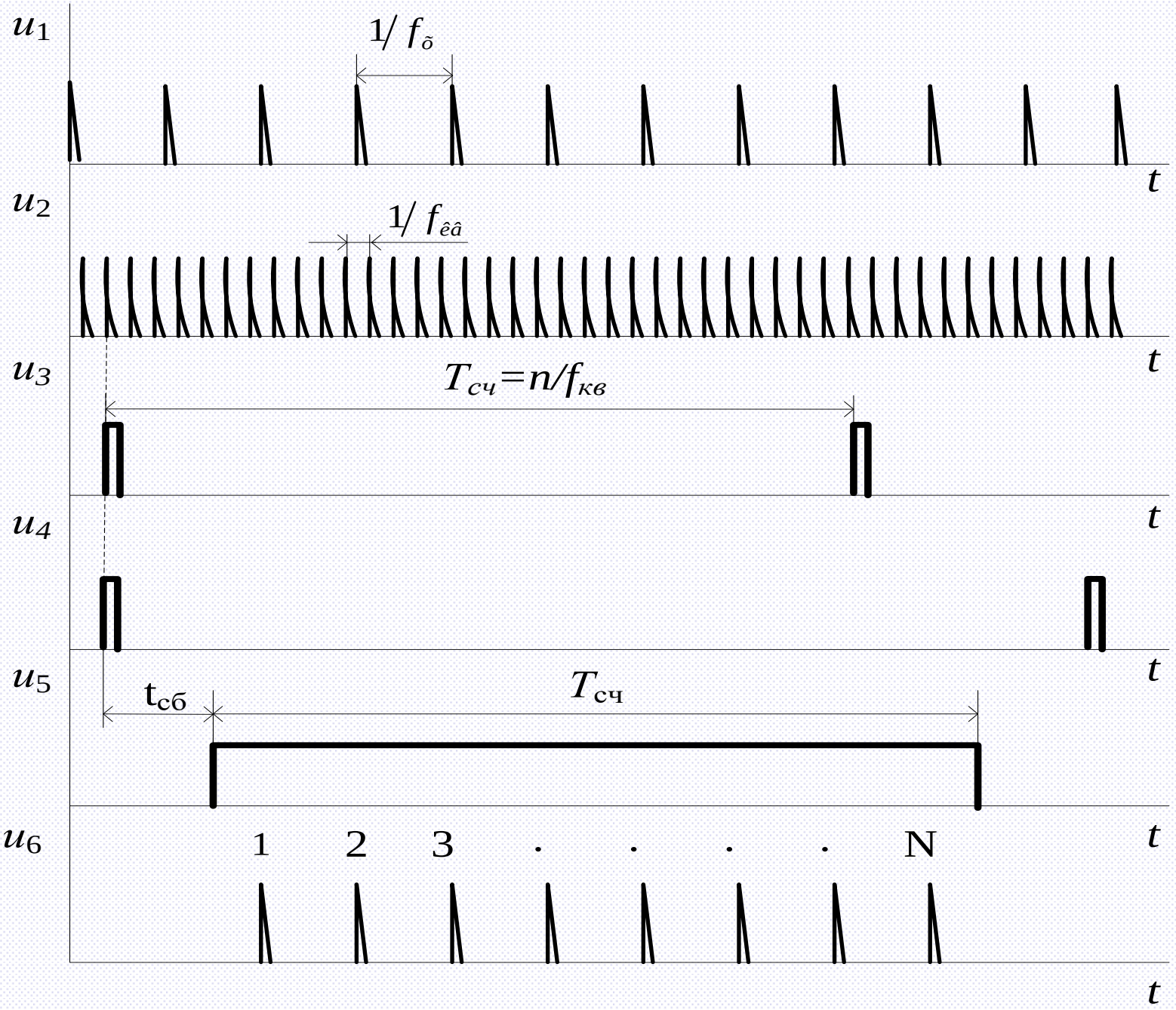
Временные диаграммы ЭСЧ при измерении частоты

$$T_{\text{сч}} = nT_{\text{кв}} = T_{\text{кв}} \cdot 10^{k}$$

$$f_{\text{кв}} = 10^{p}, \text{ Гц}$$

$$N = \text{int}[f_X \cdot T_{\text{сч}}] \pm 1$$

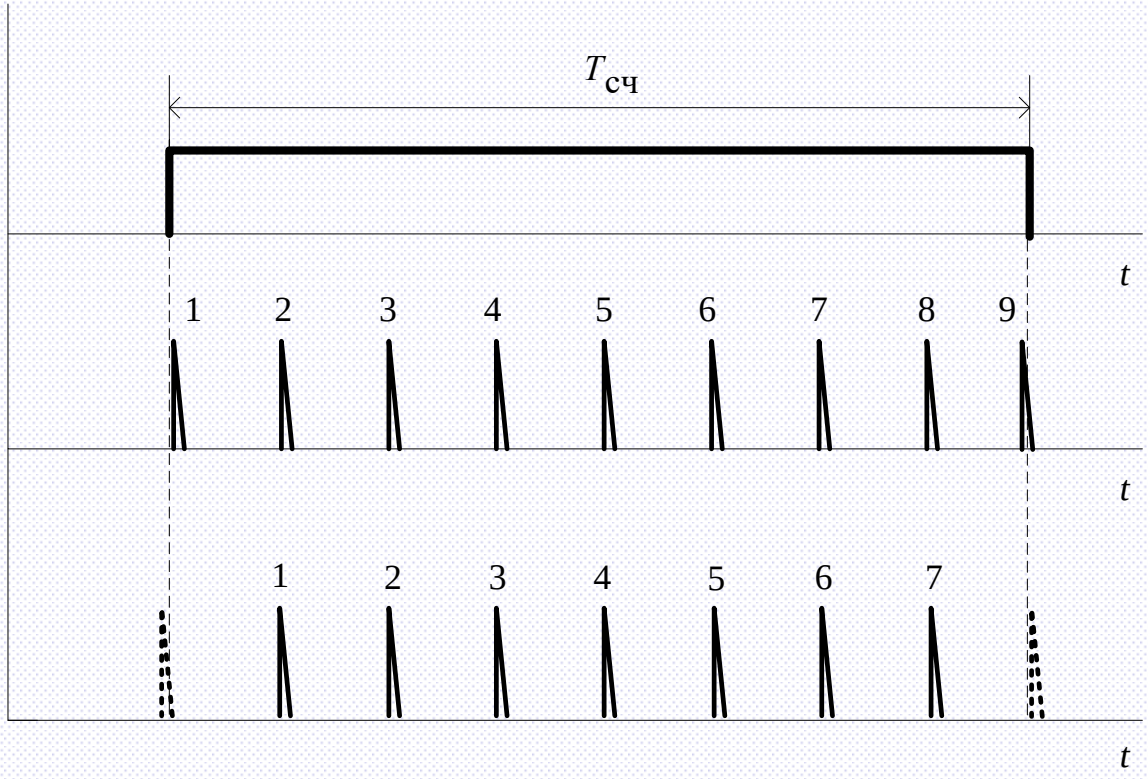
$$f_X \approx 10^{(p-k)} N, \text{ Гц}$$



Погрешность измерения частоты методом дискретного счета

$\delta f = \pm(\delta_{кв} + \delta_{д})$.

1) $\delta_{кв} = \pm \Delta f_{кв}/f_{кв}$ – нестабильность кварцевого генератора



2) Поскольку $f_x \approx \frac{N}{T_{сч}}$ и дискретность дает погрешность N ±1 импульс, то **абсолютная** максимальная погрешность дискретности $\Delta f_x \approx \frac{\pm 1}{T_{сч}}$

Относительная погрешность дискретности $\delta_{д} = \pm\left(\frac{1}{f_x \cdot T_{сч}}\right) = \pm\frac{1}{N}$

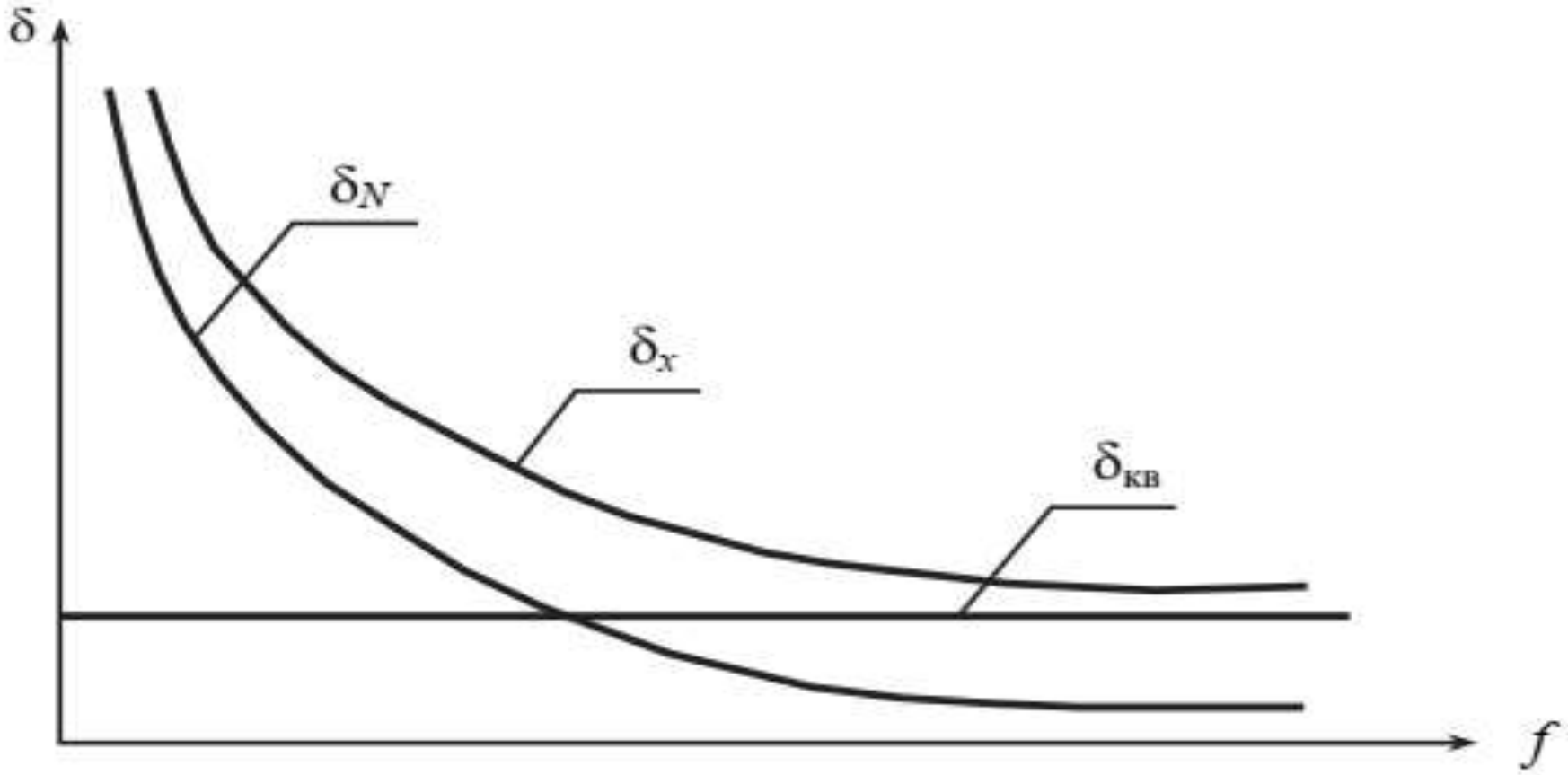


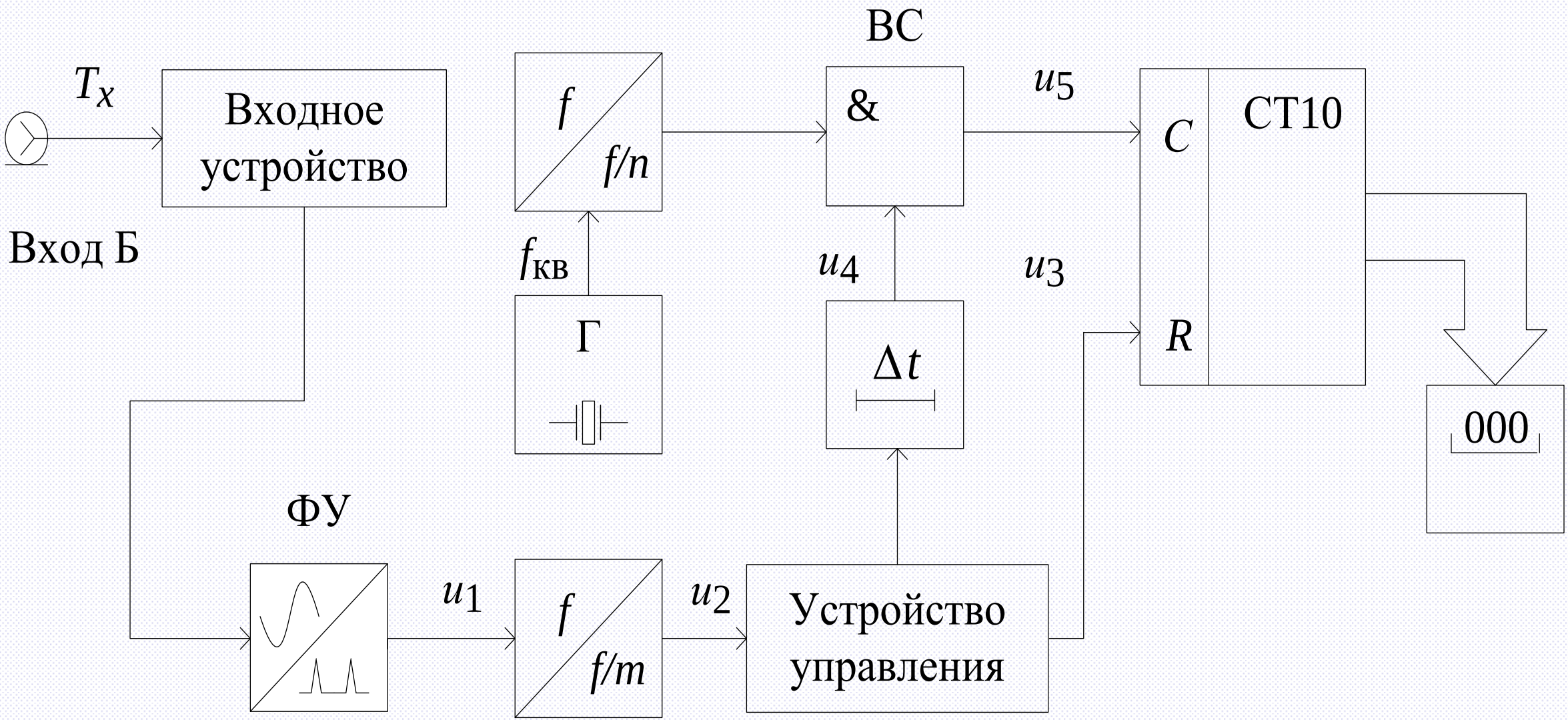
Рис. 6.16. График зависимости погрешности и её составляющих от частоты

На высоких частотах для метода прямого счета основная погрешность – нестабильность опорной частоты. На низких – погрешность дискретности

Способы уменьшения погрешности дискретности

- Увеличение длительности временных ворот *T*сч. Это приводит к росту времени измерения. На практике редко применяют время счета более 10 с.
- Умножение частоты входного сигнала в целое число раз – требует применения дополнительных устройств (умножителей частоты).
- Проведение многократных измерений с усреднением результата (учитывает случайный характер погрешности дискретности.). Увеличивается время измерения.
- Определение частоты через ***измерение периода (***косвенное измерение)

ЭСЧ в режиме измерения периода методом прямого счета



Временные диаграммы ЭСЧ при измерении периода

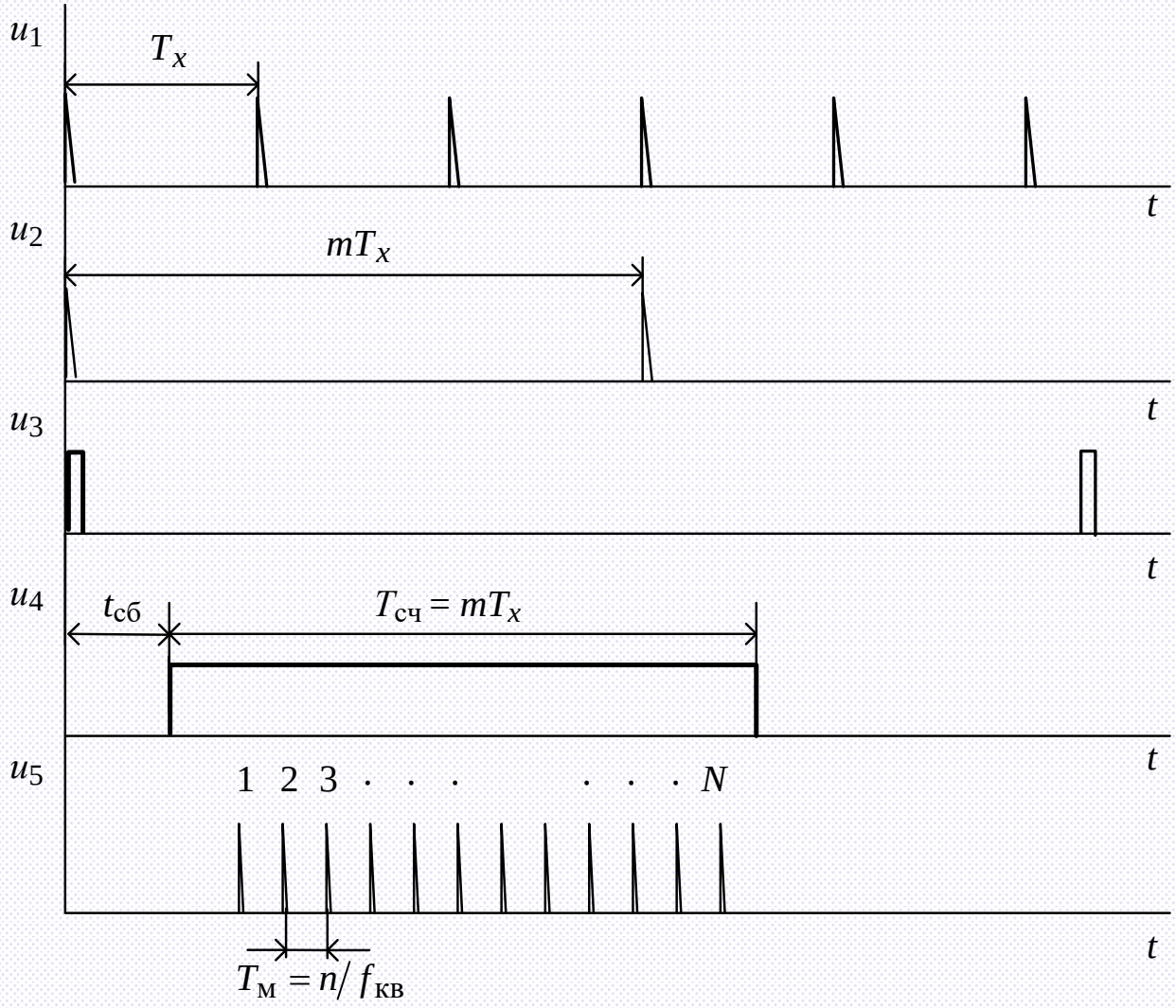
$$T_{сч} = mT_x,$$

$$m = 10^r, r = 0,1,2...$$

$$T_м = \frac{n}{f_{кв}} = n \cdot T_{кв} = 10^{-s}$$

$$N \approx \frac{T_{сч}}{T_м} = T_x \cdot 10^{(r+s)}$$

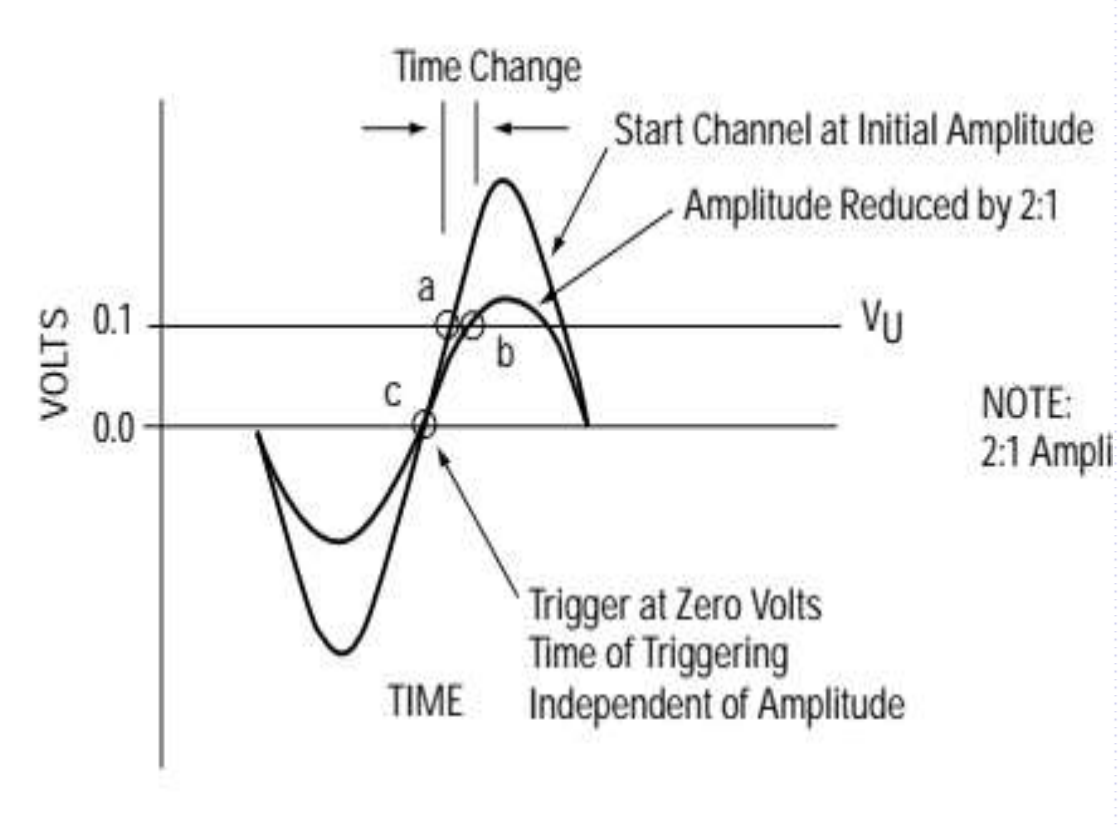
$$T_x \approx N \cdot 10^{-(r+s)}$$

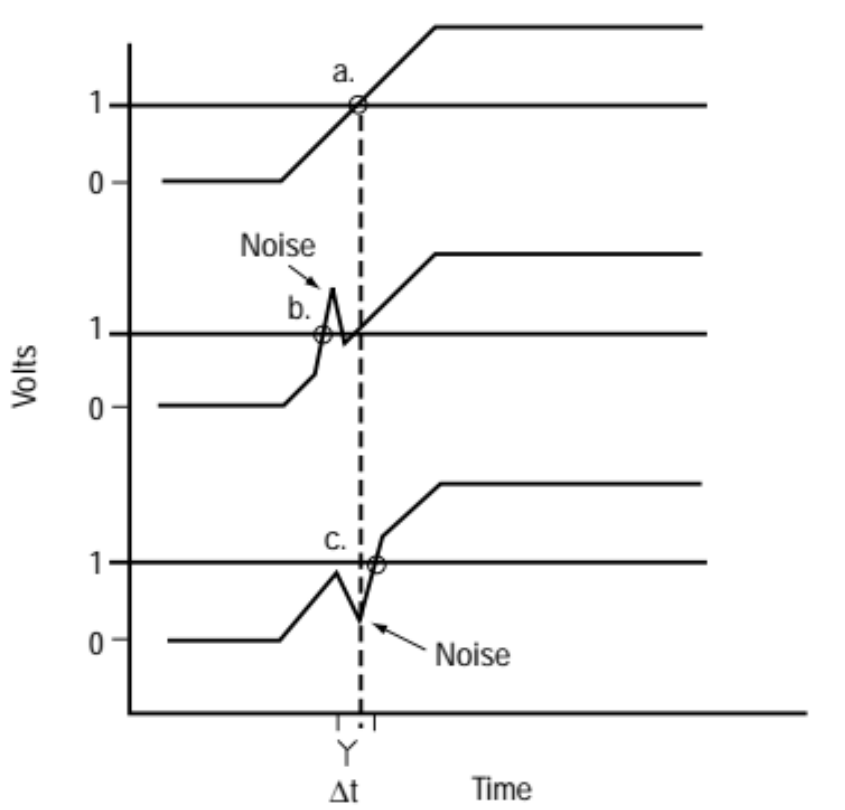


Погрешность дискретности:
абсолютная: $\Delta T_x \approx \pm T_м$

Относительная: $\delta_д = \frac{\pm T_м}{mTx} = \pm\frac{1}{mN}$

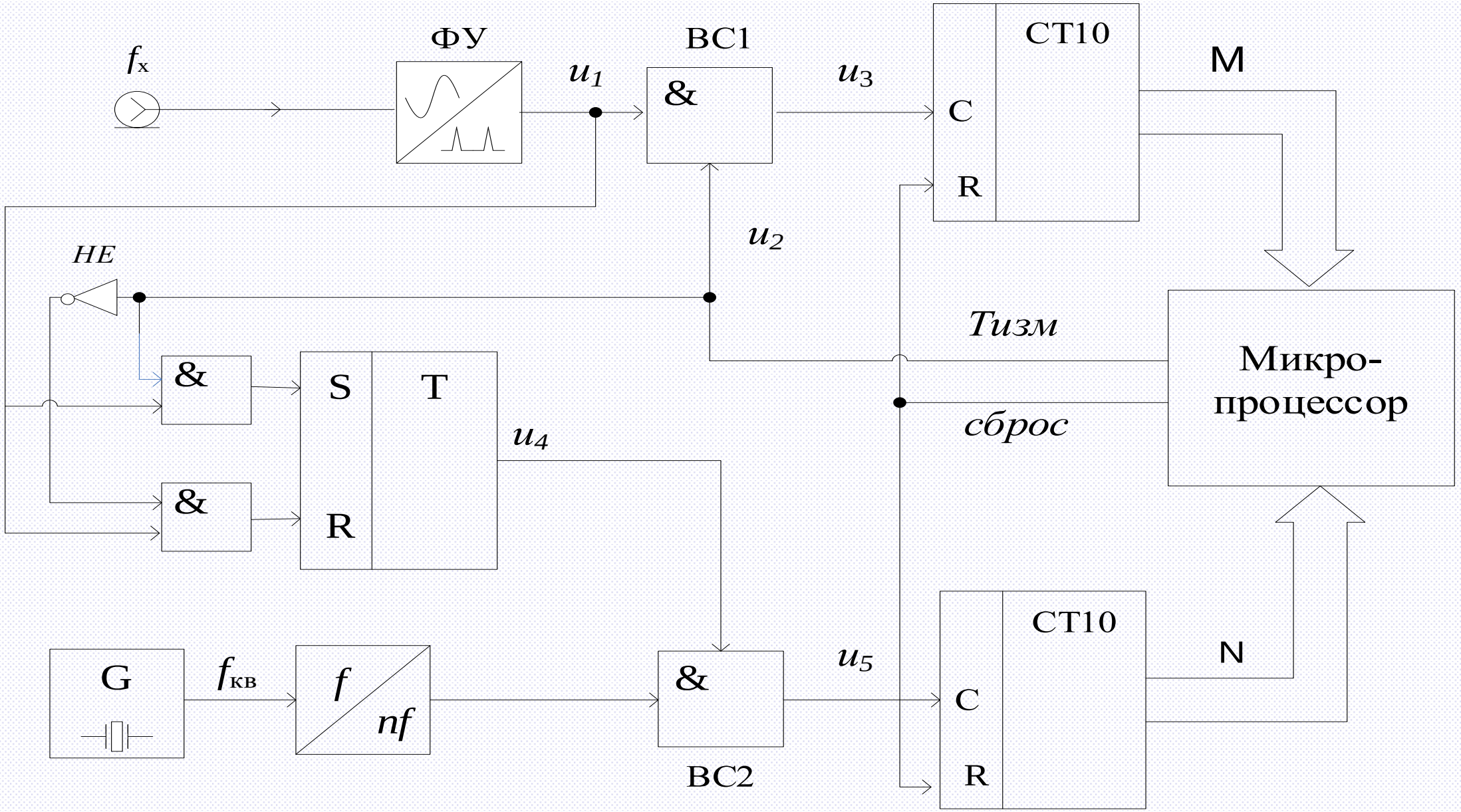
Погрешность измерения периода из-за неидеальности формирующего устройства



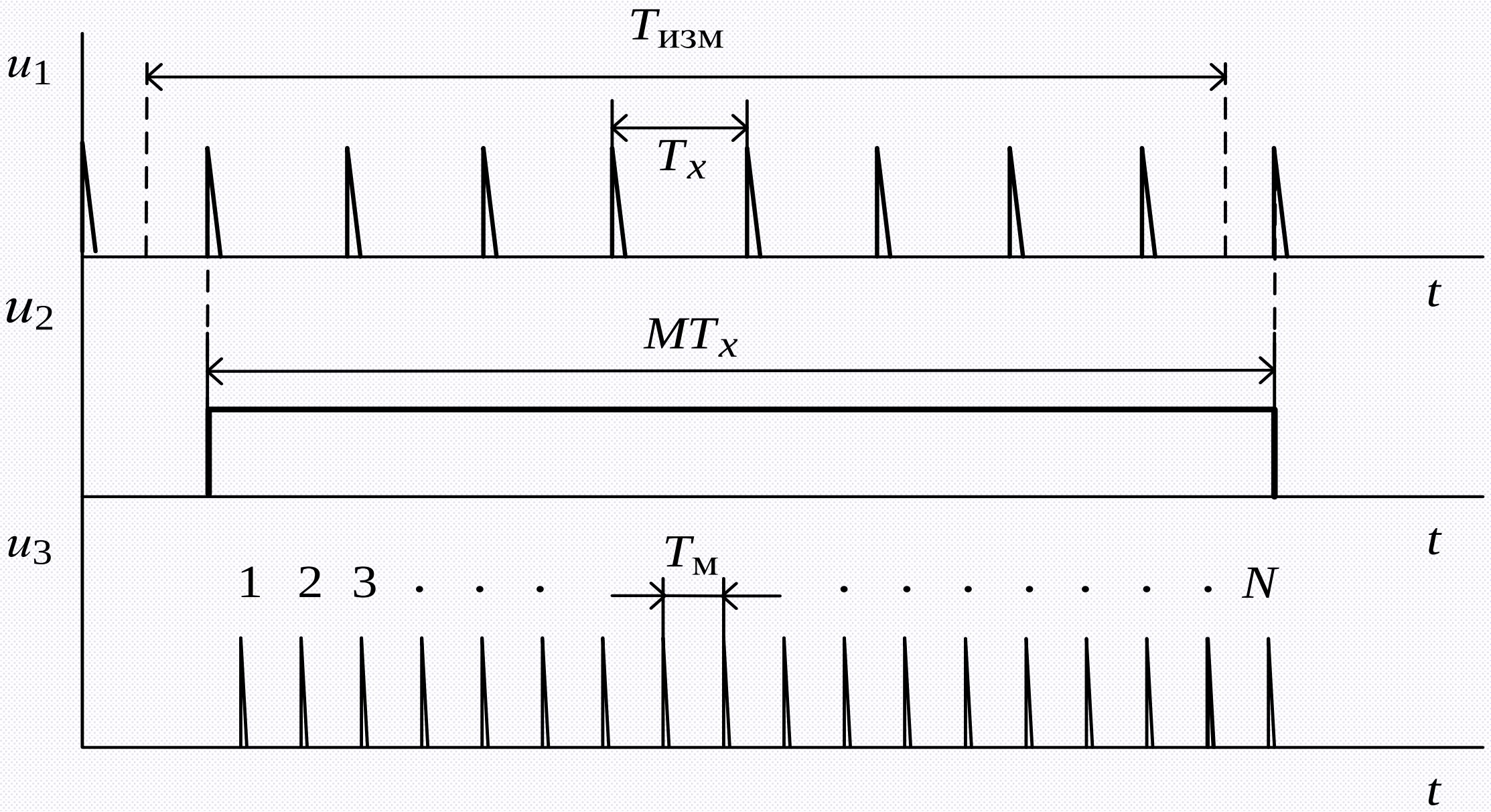


При малой амплитуде сигнала не удается получить стабильного преобразования сигнала в кратковременный импульс. Еще хуже дело при наличии шумов и помех. Выход – усиливать сигнал и использовать «усреднение (averaging)» => МНОЖИТЕЛЬ ПЕРИОДА >1. Измерение нескольких периодов сигнала дает в результате *среднее* значение периода.

Схема ЭСЧ с использованием комбинированного (косвенного) метода измерения частоты (метод «обратного счета», англ.- Reciprocal Counting)



Временные диаграммы ЭСЧ с использованием комбинированного метода измерения частоты



1. Задаем время измерения $T_{изм}$.
2. Подсчитываем количество периодов в нем M.
3. Формируем строб с длительностью MT_x.
4. Измеряем его длительность, заполняя его N метками времени $T_м$.

$$MT_X \approx N \cdot T_М \Rightarrow T_X \approx \frac{N \cdot T_М}{M} \Rightarrow f_{ВХ} = \frac{1}{T_X} \approx \frac{M}{N \cdot T_М}$$

Погрешность дискретности результата измерения формируется при измерении длительности строба MT_x метками времени $T_м$:

Абсолютная: $\Delta(MT_X) \approx \pm T_М$ относительная : $\delta_Д = \frac{\pm T_М}{MTx} \simeq \frac{\pm T_М}{Tизм}$

Погрешность косвенного метода измерения частоты

Относительная погрешность измерения не зависит от входной частоты. Погрешность дискретности зависит от выбранного времени измерения (не обязательно кратным 10!!) и длительности метки времени. Она постоянна во всем диапазоне измерения частоты.

Разрешающую способность (минимальную погрешность) таких частотомеров указывают не в единицах частоты (Гц), а в количестве десятичных знаков результата ***для времени счета 1 секунда***. Пример: при частоте кварцевого генератор 100 МГц ($T_м$=10 нс) разрешающая способность - 8 знаков

Измерение временных интервалов в ЭСЧ :формирование временных ворот от старт-стопных импульсов

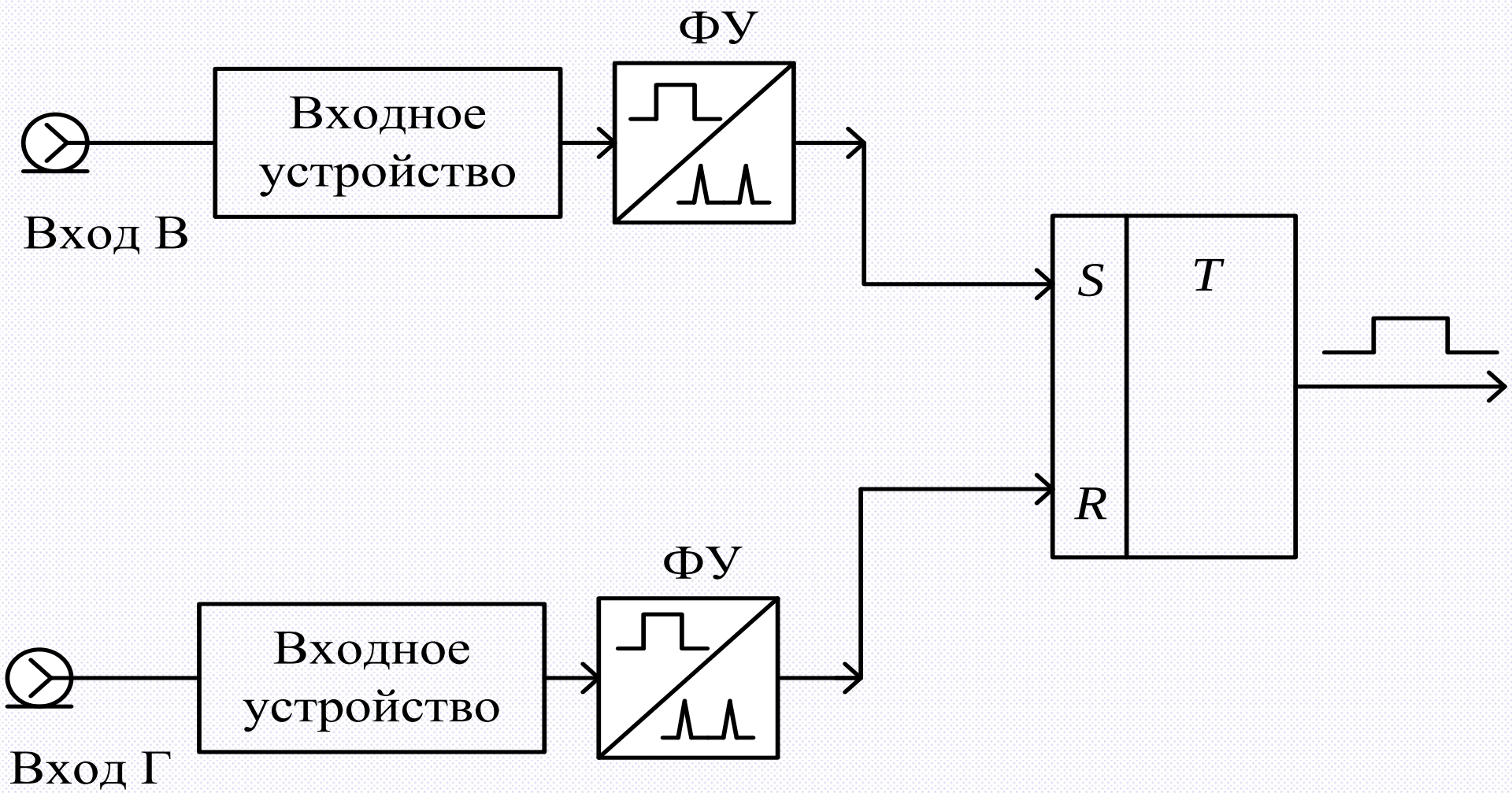
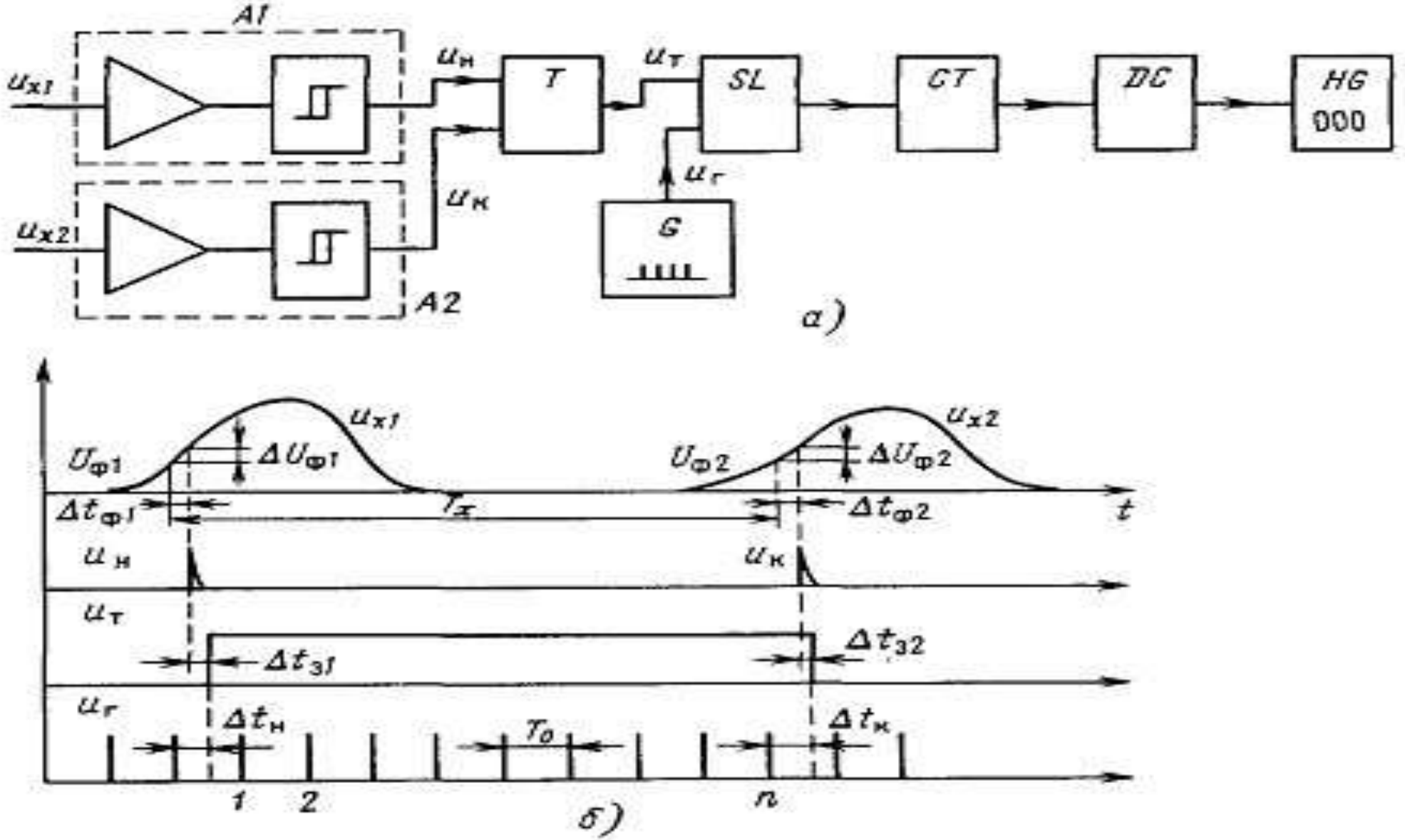
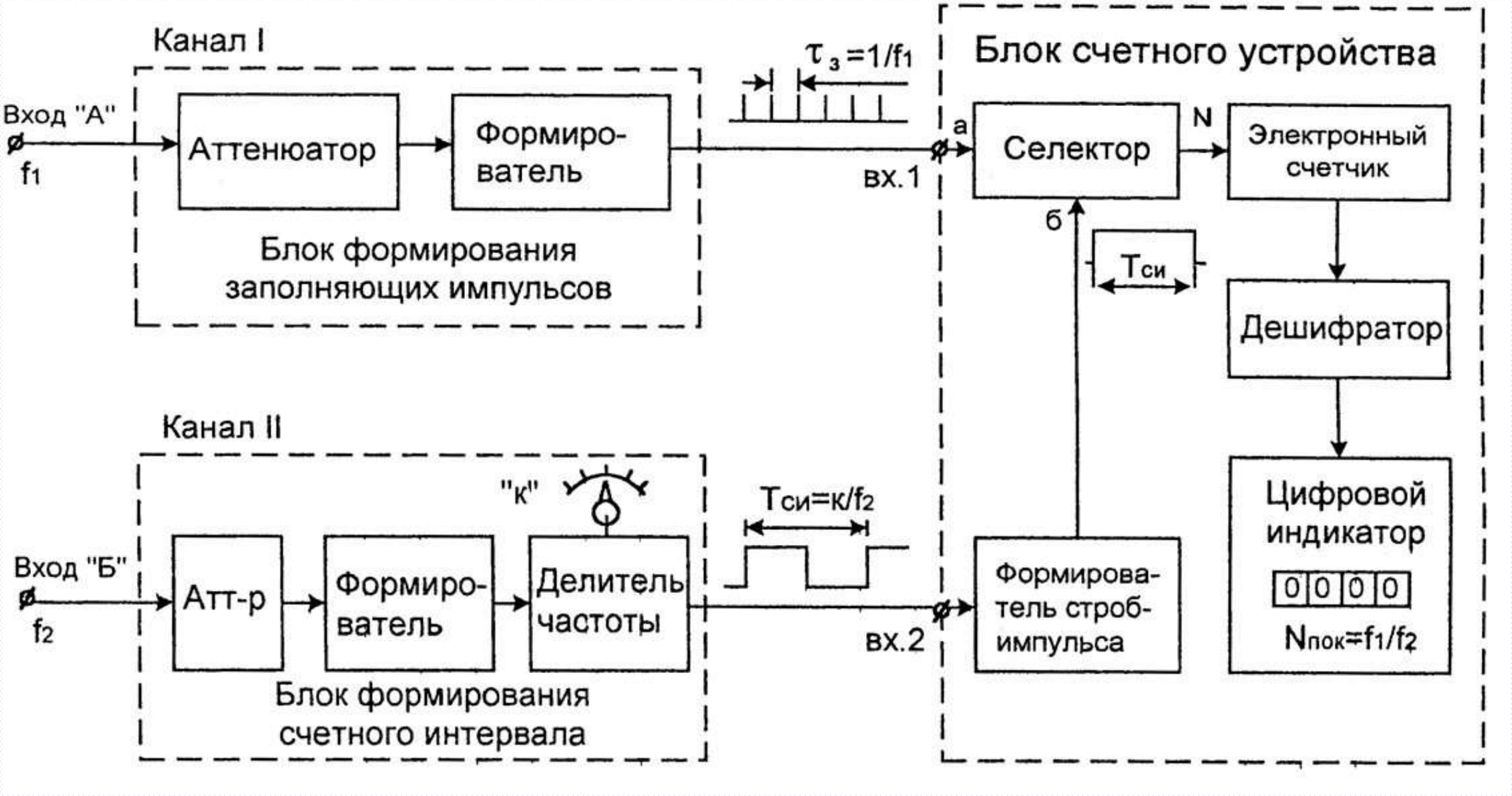


Схема ЭСЧ в режиме измерения временных интервалов. Погрешности при формировании временных ворот



Измерение отношения частот двух сигналов в ЭСЧ



Отечественный частотомер МНИПИ Ч3-96



Частотомер электронно-счетный АКИП-5102/1



Частотомер Keysight Technologies 53230A (2 канала lo 350 МГц.

Опционально СВЧ канал до 6 ГГц



Agilent (Keysight) 53181A Frequency Counter:

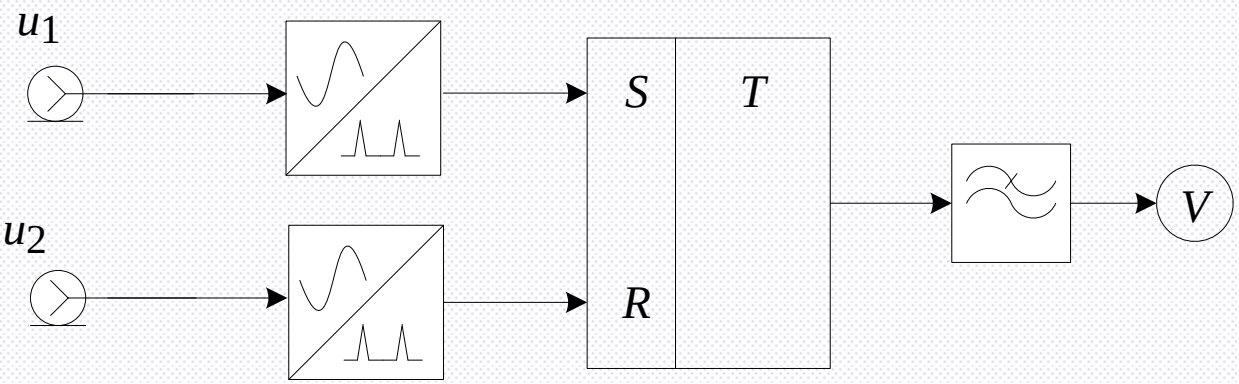
Вход 1 - до 225 МГц, вход 2 - до 12.5 ГГц

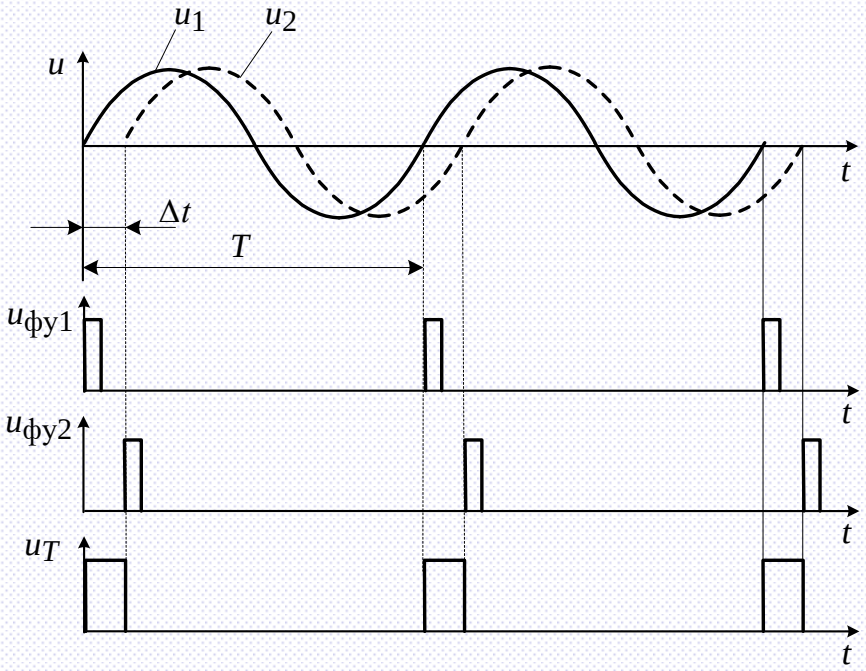


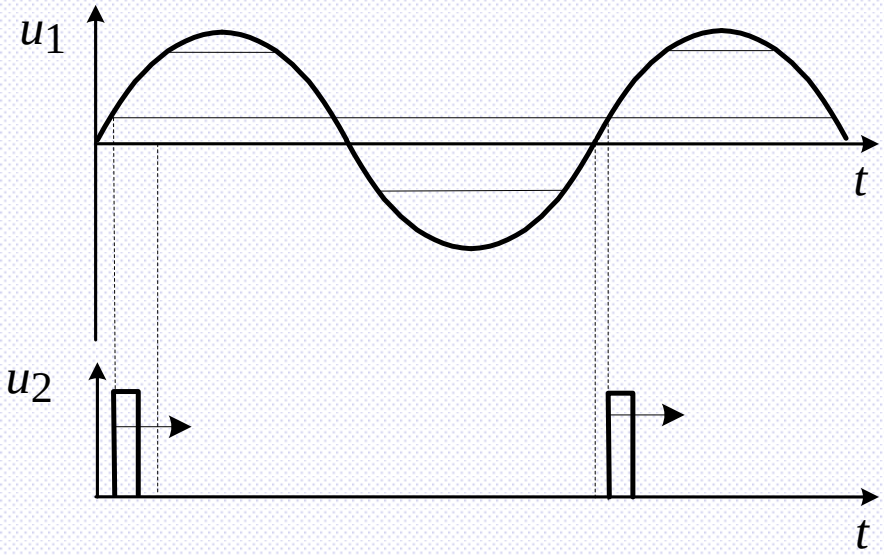
Измерение фазового сдвига

Преобразование фазового сдвига в напряжение

Преобразователь фаза-время

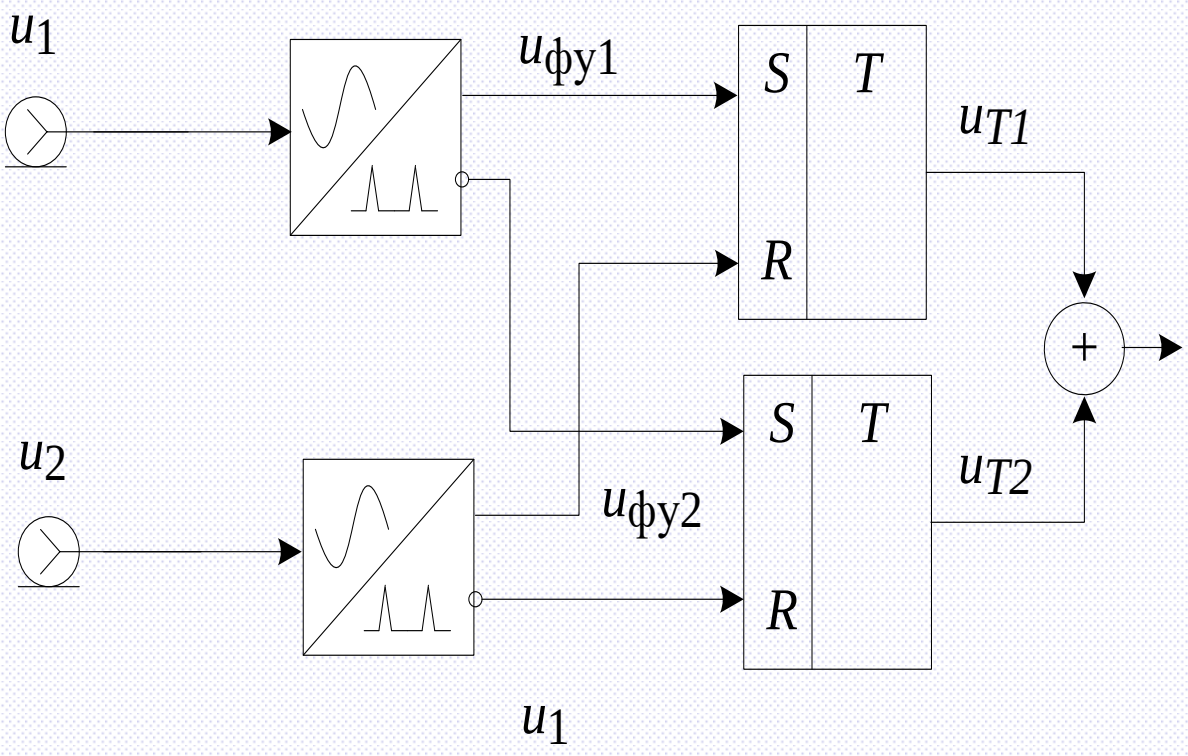


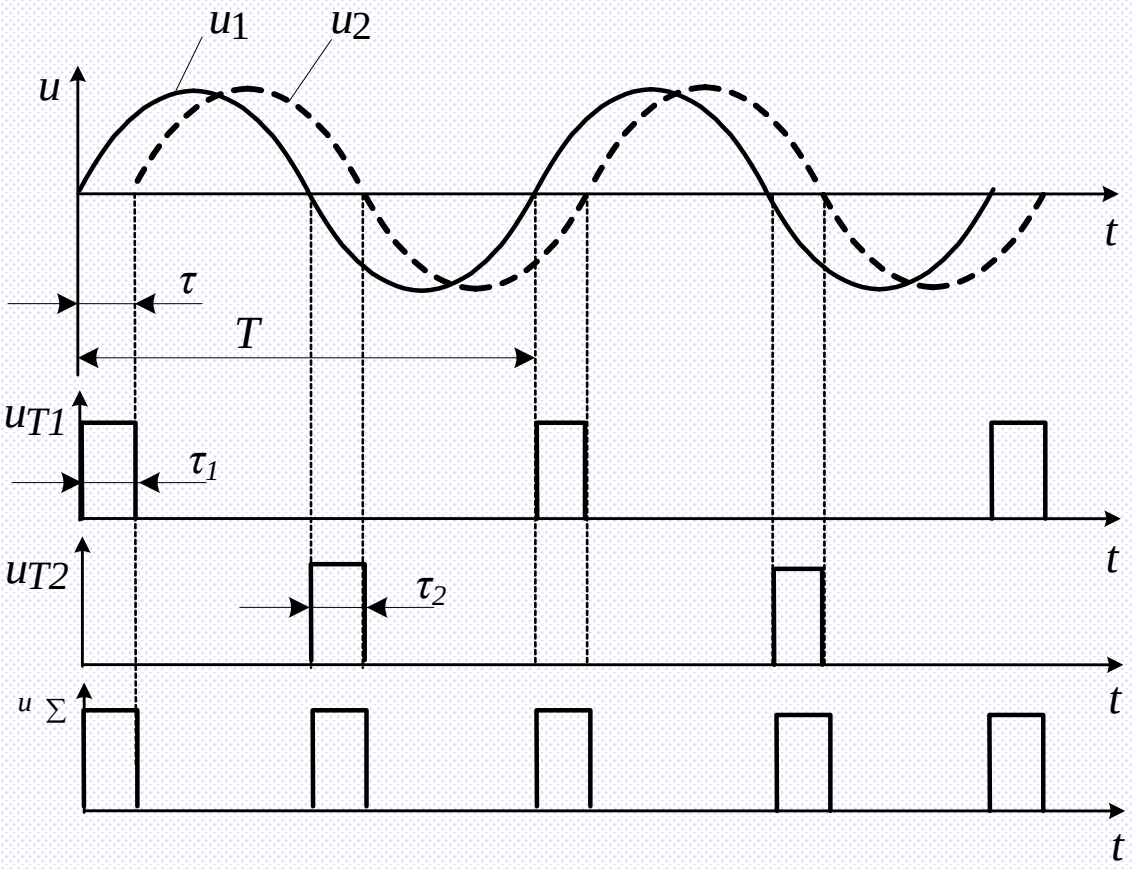




Погрешность преобразования фопмирующих устройств

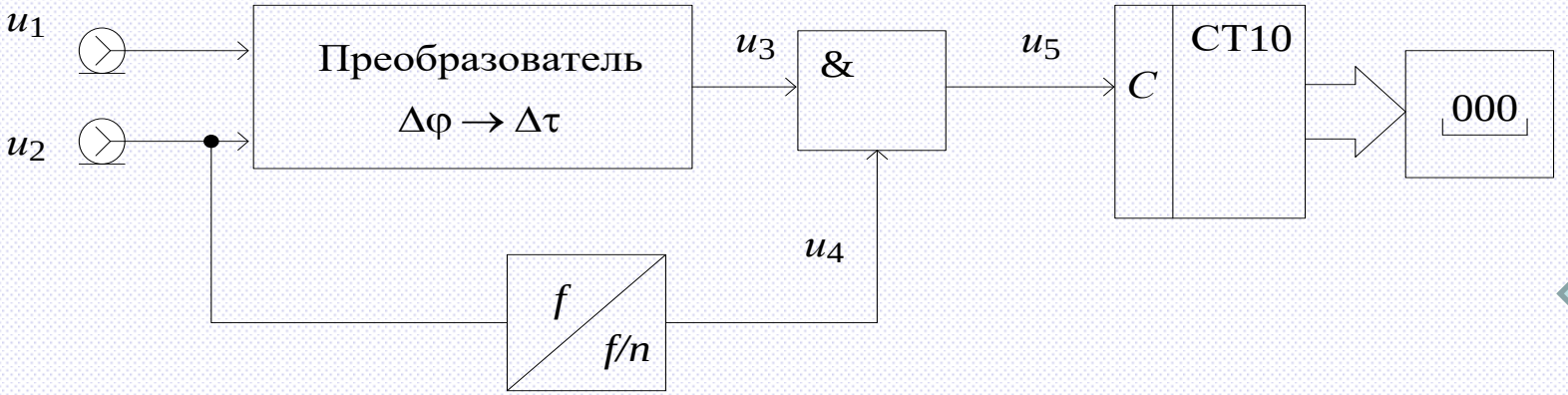
Двухтактная схема преобразователя фаза-время



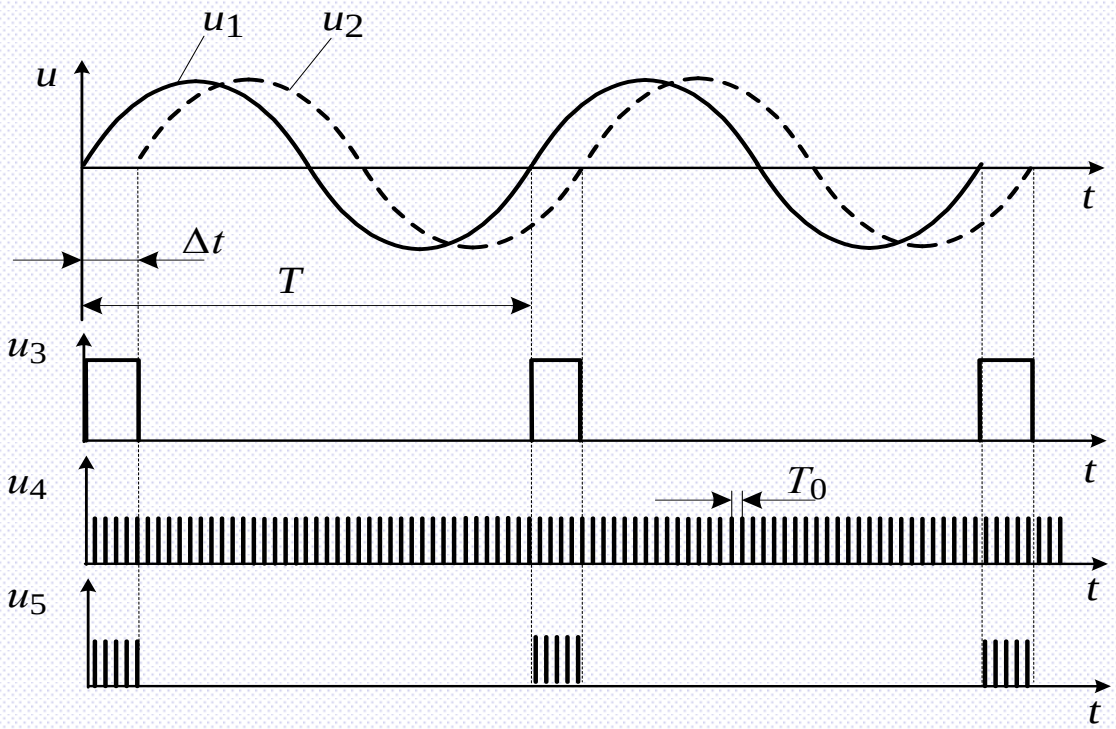


$$U_{\text{изм}} = \frac{1}{T}\int_0^T u_{\Sigma}(t)dt = \frac{1}{T}\left(U_0 \cdot \tau_1 + U_0 \cdot \tau_2\right) = \frac{U_0}{T}\left(\tau + \Delta\tau_{\varphi} + \tau - \Delta\tau_{\varphi}\right) = \frac{2U_0\tau}{T} = \frac{2U_0\Delta\varphi}{360^\circ}.$$

Преобразование фазового сдвига во временной интервал и измерение среднего фазового сдвига методом дискретного счета



а



б

$$n = 36 \cdot 10^m \quad \text{где } m=1,2,3\ldots$$

$$N = \frac{\Delta t}{T_0} = \frac{\Delta t}{T} \cdot n =$$

$$= \frac{\Delta\varphi}{360^\circ} \cdot n = \Delta\varphi \cdot 10^{m-1}$$

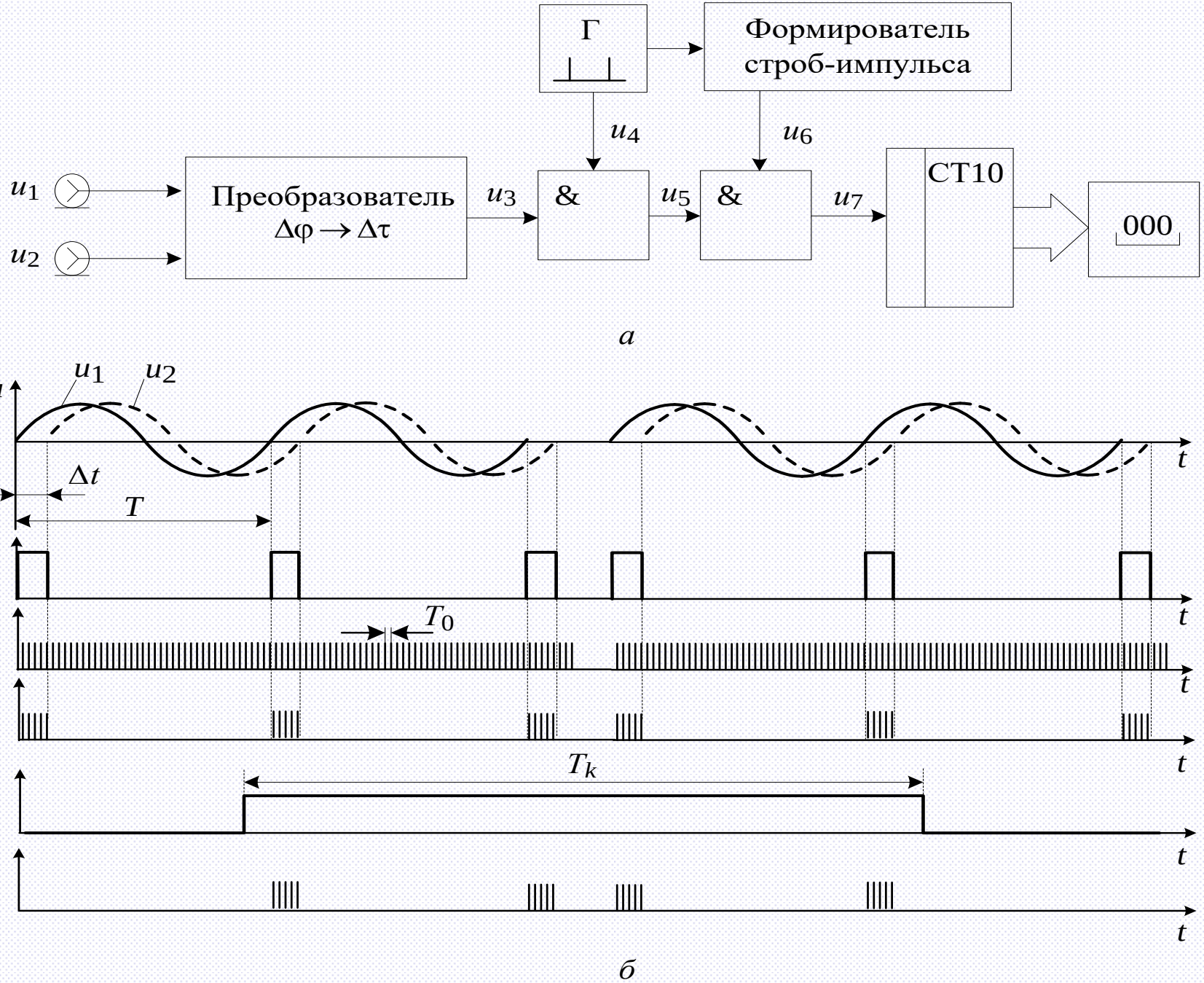
Интегрирующий цифровой фазометр

$$M = \frac{T_{сч}}{T} = \frac{T_0 K}{T},$$

$$K = 10^m$$

$$MN = \frac{T_0 \cdot K}{T}\frac{\Delta t}{T_0} =$$

$$= \frac{\Delta\varphi}{360^\circ} K = \Delta\varphi 10^m$$



Микропроцессорный фазометр

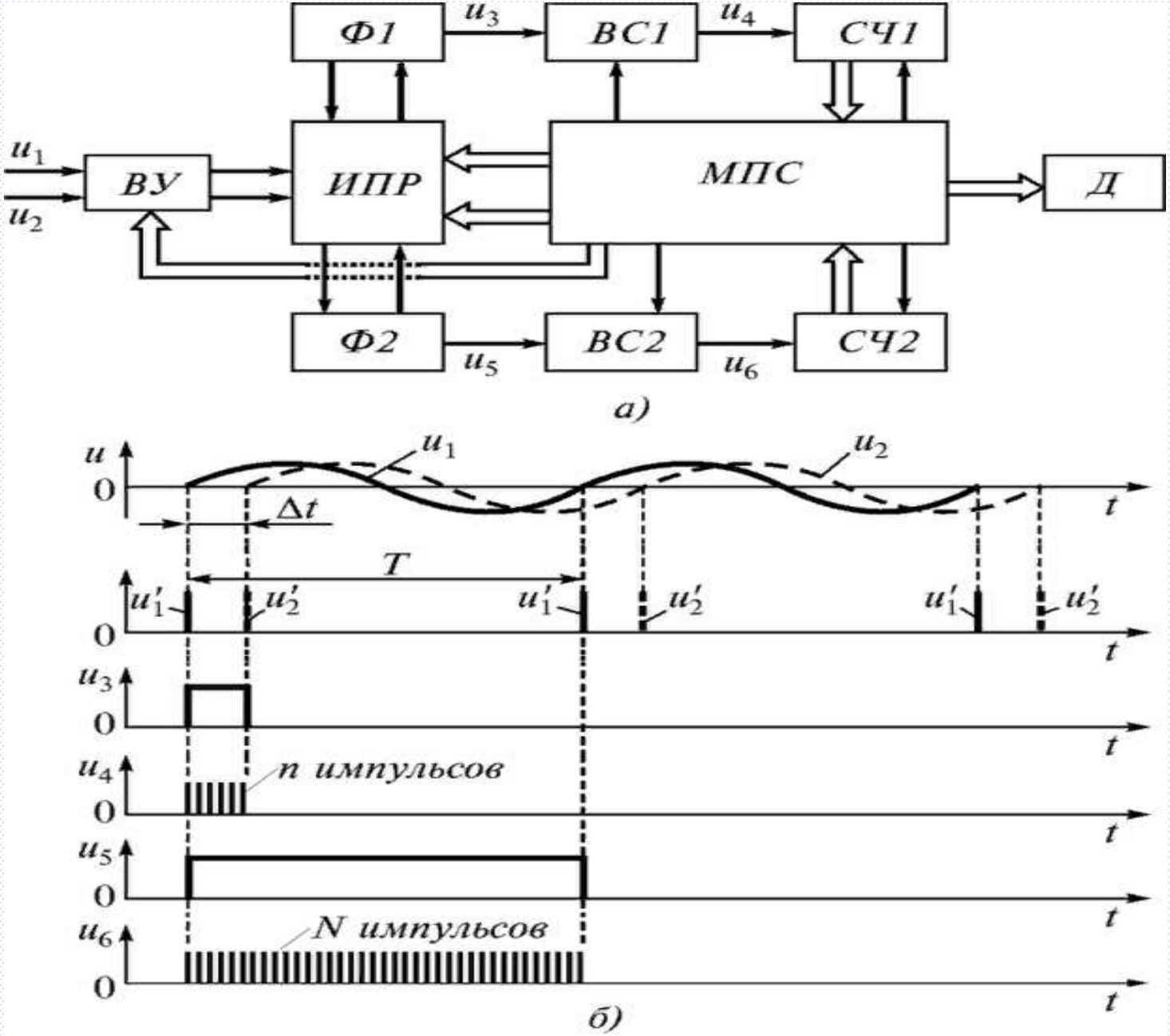
ИПР- импульсный преобразователь входных сигналов (ФУ)

Ф1 и Ф2 – формирователи временных ворот, ВС1 и ВС2 – временные селекторы,

СЧ1 и СЧ2 – счетчики временного интервала и периода

$$n \simeq \frac{\Delta t}{T_0}, \qquad N \simeq \frac{T}{T_0},$$

$$\Delta\varphi = 360^\circ \frac{\Delta t}{T} \simeq \frac{360^\circ n}{N}$$



ЭСЧ Ч3-85/5 с функцией измерения фазового сдвига



Цифровой измеритель разности фаз ФК2-29 (0.1…1000 МГц)



измеритель разности фаз ФК2-34

Пределы основной погрешности измерения фазовых сдвигов:
±(0,1- 0.6)° (100 кГц - 5 МГц)



Измеритель разности фаз Ф2-41

в диапазоне частот от 0,1 Гц до 100 МГц



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!







МИНОБРНАУКИ РОССИИ

«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ” им. В. И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ)

Факультет радиотехники и телекоммуникаций,
Кафедра Теоретических основ радиотехники

http://kepstr.eltech.ru/tor/ptri

А.А. Данилин

«Приборы и техника радиоизмерений»
(электронный конспект лекций)

Цифровые измерительные генераторы. Генераторы шума

Санкт-Петербург
2024 г.

Измерительные генераторы – источники образцовых (тестовых) сигналов. Отличаются возможностью установки формы и параметров выходных сигналов с заданной точностью (с нормируемыми метрологическими параметрами).

Типы измерительных генераторов по принципу действия

- *Аналоговые* генераторы (подгруппа приборов Г-) – изучались в курсе ОМРИ (RC-генераторы (Г3-), LC- генераторы (Г4-), генераторы импульсов (Г5-), функциональные генераторы (Г6-)) *– изучались в курсе ОМРИ*
- *Синтезаторы* частоты - генераторы гармонических сигналов, частота которых формируется путем деления и умножения, сложения и вычитания частот опорного высокостабильного генератора и его гармоник.
- Генераторы сигналов произвольной формы с прямым цифровым синтезом сигнала (Direct Digital Synthesis – DDS)

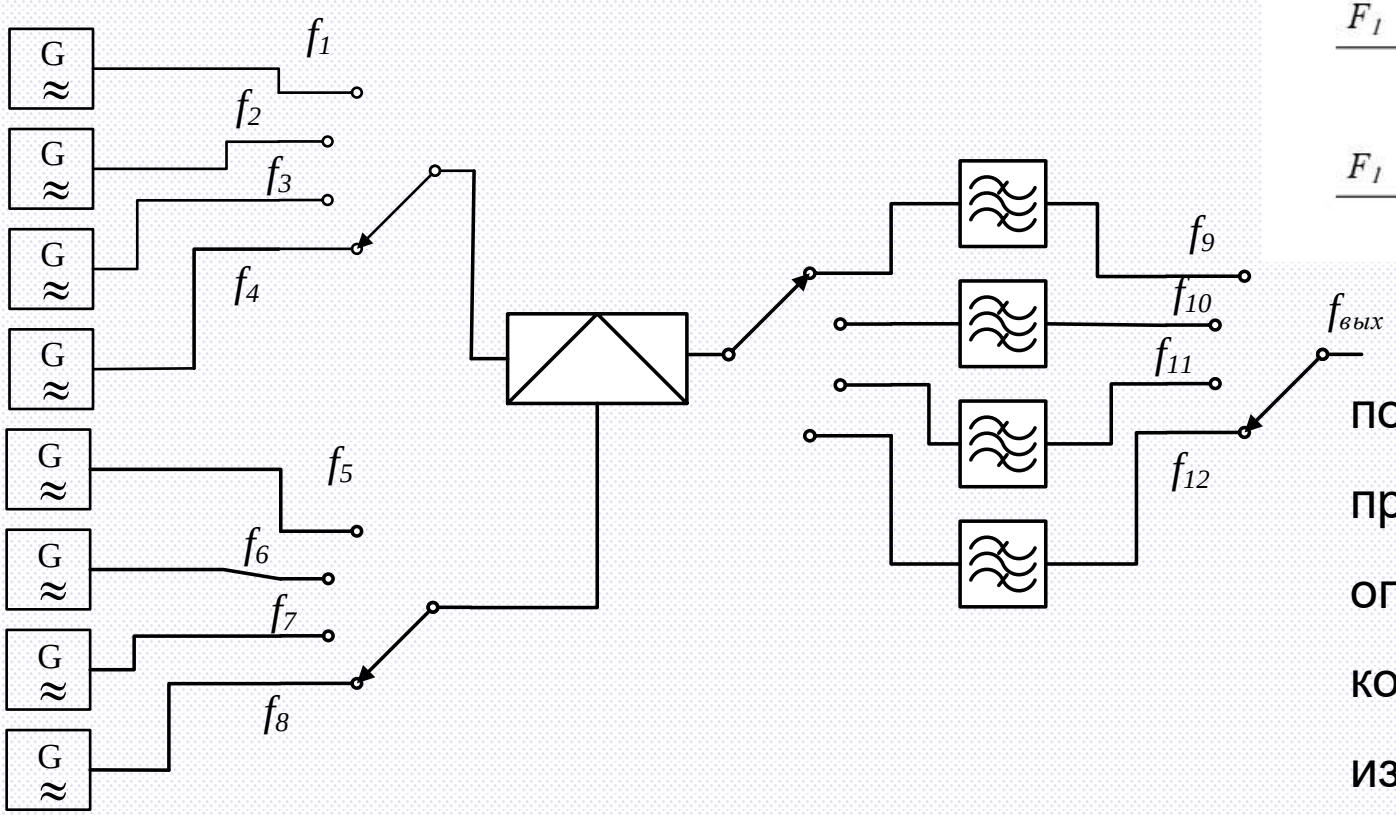
Синтезаторы частоты *Синтезаторами* называют генераторы гармонических сигналов с дискретной перестройкой частоты и стабильностью, равной стабильности частоты опорного кварцевого генератора. Синтезаторы позволяют получать сетку частот выходного сигнала с дискретностью до сотых долей герц.

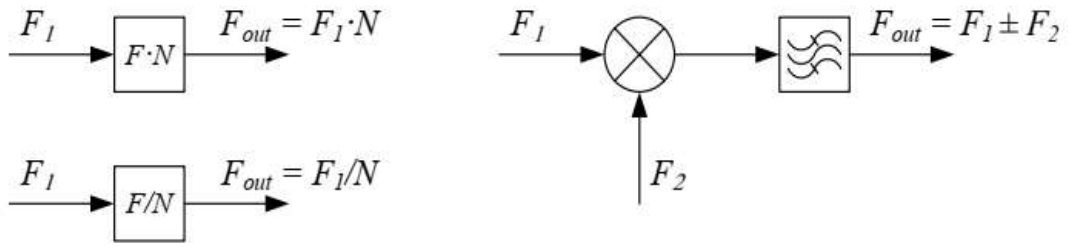
Различают несколько способов построения синтезаторов частоты:

- Синтезаторы с *прямым аналоговым синтезом* частоты (Direct Analog Synthesizers DAS). Основаны на сложении, вычитании, умножении и делении частоты опорного гармонического сигнала. Применяют на относительно низких частотах.
- Синтезаторы с *косвенным синтезом* частоты (Indirect Synthesizers). Основаны на применении фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ или PLL - Phase Locked Loops), содержат СВЧ генератор, управляемый напряжением (ГУН или VCO - Voltage Controlled Oscillator).

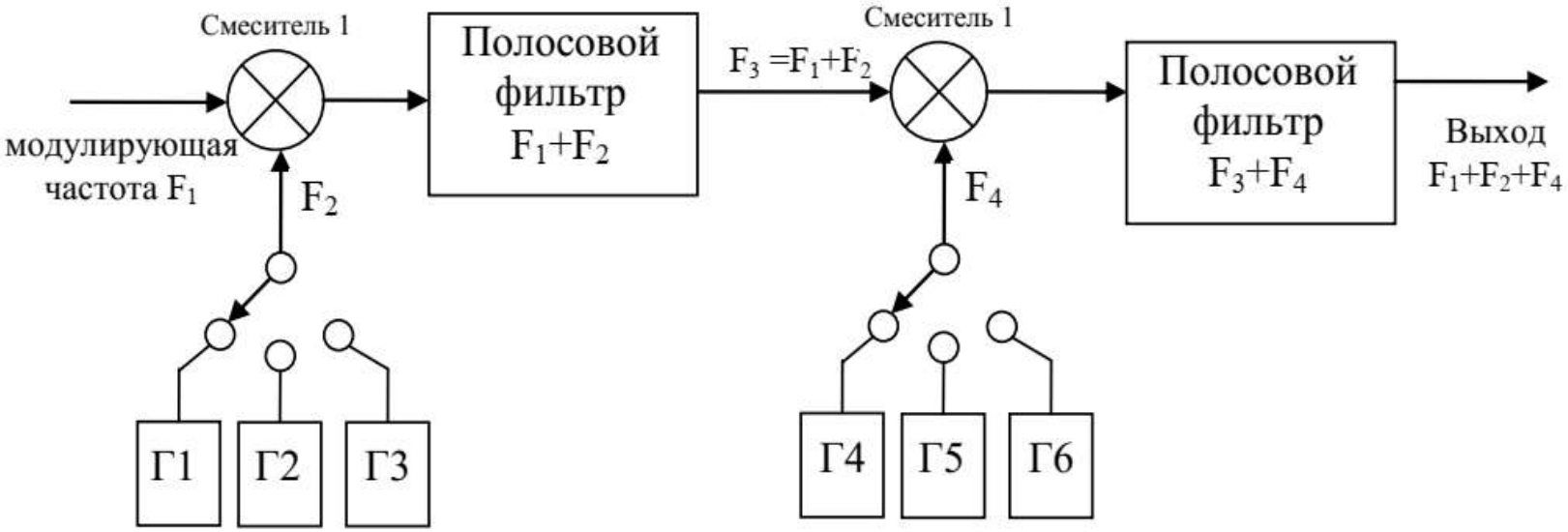
Синтезаторы с прямым аналоговым синтезом (Direct Analog Synthesis, DAS)

Синтезаторы с прямым аналоговым методом синтеза частоты основаны на изменении частоты опорного колебания с помощью операций умножения, деления, сложения и вычитания частот.





Сигнал опорного кварцевого генератора с помощью умножителей и делителей частоты преобразуется в набор сигналов - сетку опорных частот f_1, f_2... f_n. С помощью коммутатора на смеситель подают два сигнала из сетки, на выходе подключают фильтр, которым выделяют сигнал с суммарной или разностной частотой, равной заданной выходной частоте синтезатора.





Синтезатор с аналоговым методом синтезаЧ6-31

Пример формирования частоты сигнала: F1 = 1МГц, F2=0.3 МГц, F3=0.07 МГц. Итоговая частота =1.37 МГц. Очистку результирующего сигнала от побочных колебаний проводят с помощью системы узкополосных ППФ. Синтезаторы управляются по частоте переключением источников из сетки опорных частот (обычно кнопочной панелью , набором значения требуемой частоты).

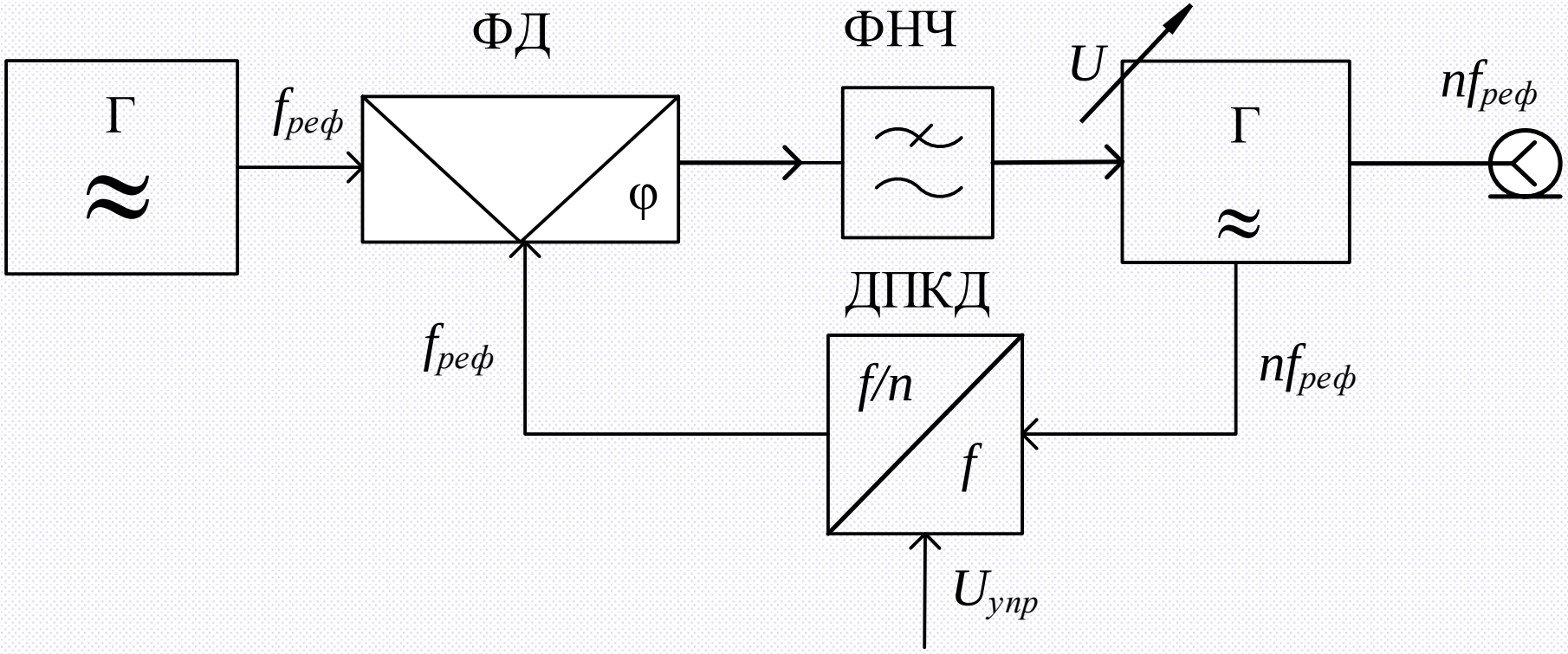
Синтезаторы такого типа имеют дискретное (цифровое) управление по частоте, но сам сигнал формируется аналоговым способом. Достоинствами таких генераторов является ***высокая скорость перестройки*** частоты (ограничен скоростью коммутации и задержкой в фильтрах) и ***низкий фазовый шум***. Форма выходного сигнала – гармоническая, без ступенек (в отличие от генераторов DDS). Стабильность частоты выходного сигнала соответствует стабильности опорного генератора и может быть на уровне эталона частоты. Важная особенность DAS-синтезатора - возможность возвращения на любую частоту и продолжения работы в той же фазе («фазовая память»)

Недостатками синтезаторов DAS являются значительный уровень побочных гармоник, ограниченный частотный диапазон, сложность коммутации и громоздкость схемы (особенно при малом шаге перестройки).

Применяют прямой аналоговый синтез на относительно низких частотах. Спектральный состав выходного сигнала не очень хороший – присутствуют неотфильтрованные паразитные сигналы с комбинационными частотами. Однако *уровень фазового шума* мал – он соответствует шуму опорного генератора.

Синтезаторы с косвенным принципом формирования частоты (Indirect Analog Synthesis) или синтезаторы с ФАПЧ (Phase Locked Loop, PLL)

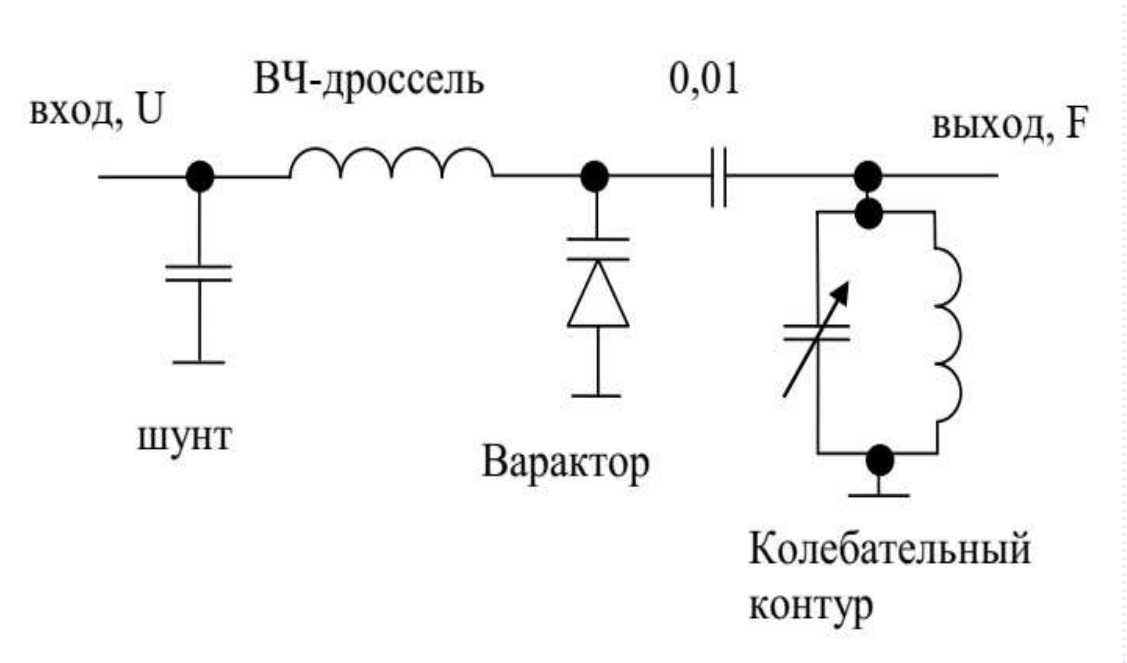
Наиболее часто используемый способ цифрового управления по частоте. Схема синтезатора включает в себя программируемый *делитель частоты с переменным коэффициентом деления* (ДПКД), генератор, управляемый напряжением (ГУН) и фазовый детектор системы ФАПЧ с ФНЧ.



На фазовый детектор подают два колебания: первое с частотой сравнения $f_{реф}$, которая получается путем деления частоты опорного эталонного генератора f оп в M раз, второе - с выходной частотой ГУН, деленной на N . Напряжение с выхода фазового детектора подстраивает ГУН до обеспечения равенства частот на входах ФД . Изменяя коэффициенты деления M и N, получают требуемую сетку частот выходного сигнала с шагом, равным :

$$f_{вых} = f_{оп} \frac{N}{M}$$

$$\Delta f_{вых} = f_{оп} / M$$



ГУН - автогенератор, содержащий частотозадающую цепь (LC-контур), рабочая частота которого меняется напряжением (tuning voltage), приложенным к ***варикапу.*** Это п/п диод, барьерная емкость которого зависит от запирающего напряженияуправления. Часто его называют «***вара́ктор»*** - от англ. **var**iable — переменный и **actor** — тот, кто действует).

Синтезатор с ФАПЧ вырабатывает аналоговый сигнал с дискретно регулируемой частотой. Стабильность частоты выходного сигнала равна стабильности опорного сигнала. Форма сигнала ГУН **может быть любой** !!.

Главным преимуществом схем на основе ФАПЧ по сравнению с DAS – синтезаторами являются ***более чистый спектр*** выходного сигнала, ***широкий частотный диапазон*** (до СВЧ) и простота конструкции. Основные недостатки - значительное время перестройки частоты (обратно пропорциональное полосе пропускания фильтра ФАПЧ), более высокий уровень фазового шума. Шум синтезатора с ФАПЧ включает шум ГУН, фазовые шумы опорного сигнала, фазового детектора, усилителя и ДПКД. Важно, что общий фазовый шум зависит от коэффициента деления ДПКД, который может быть довольно большим для обеспечения требуемого разрешения по частоте.

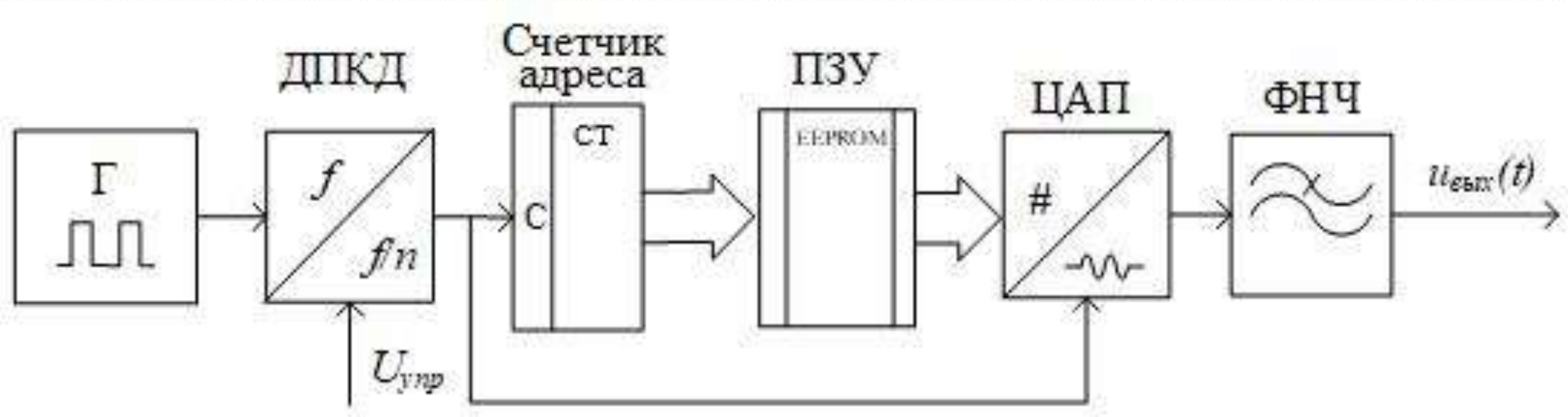
Генератор ВЧ сигналов N9310A
– аналоговый синтезатор частоты с ФАПЧ



– Диапазон частот от 9 кГц до 3 ГГц, НЧ выход – от 20 Гц до 80 кГц
– Диапазон выходного уровня от –127 до +13 дБм (макс. Устанавливаемое значение +20 дБм)
– Фазовый шум SSB –95 дБн/Гц
– Аналоговая модуляция: АМ, ЧМ, ФМ и импульсная модуляция

Измерительные генераторы на основе прямого цифрового синтеза сигналов

Принцип работы DDS генераторов – формирование потока цифровых кодов, содержащих требуемую форму сигнала. Эти коды с помощью высокоскоростного ЦАП преобразуются в аналоговый образ синтезированного выходного сигнала.



Наиболее простым методом формирования отсчетов формы сигнала (например, функции sin) является *табличный* метод. Данные отсчетов функции sin(x) берутся из заранее заполненной таблицы с частотой, задаваемой генератором частоты дискретизации (меняется делителем ДПКД). Максимальная частота выходного сигнала не может превышать половины частоты дискретизации (на самом деле – она существенно меньше).

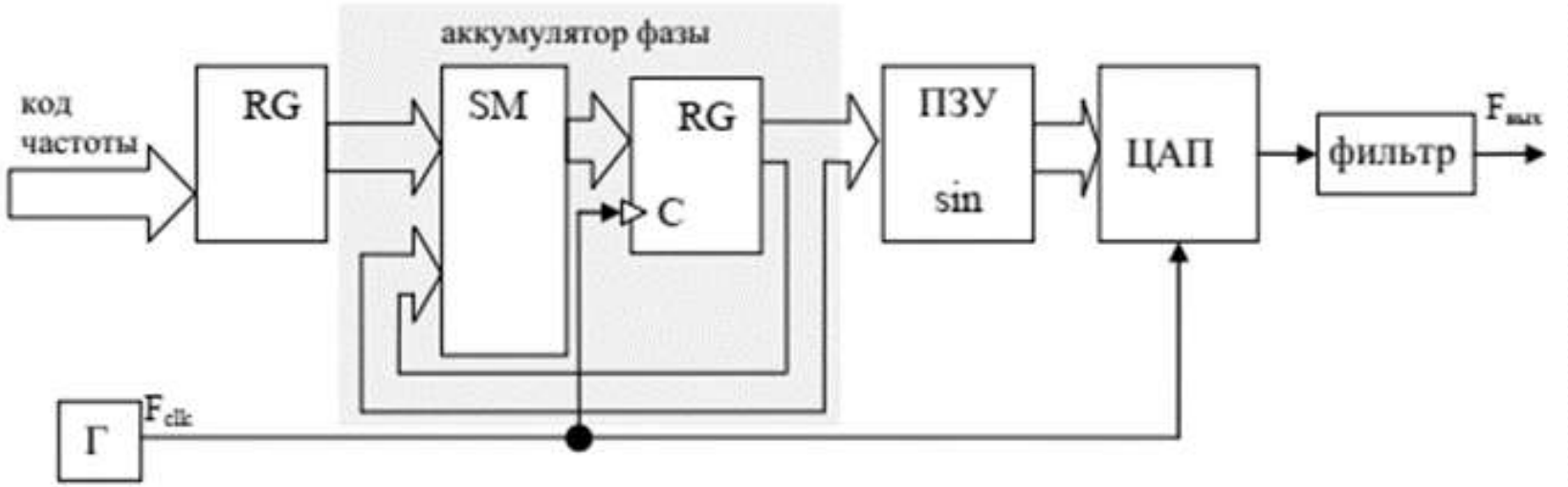
Аргумент функции sin (или *фаза сигнала)* должен меняться во времени линейно (нарастает). Сформировать линейно меняющуюся последовательность кодов способен сделать простой двоичный счетчик адреса («цифровой интегратор»). Счетчик формирует адрес ПЗУ, куда записана таблица отсчетов сигнала (Look Up Table) одного периода функции *sin (x).* Для уменьшения объема ПЗУ можно использовать свойства симметрии функции sin и хранить только четверть периода..

Выходной код ПЗУ равен значению функции sin (x) для текущей фазы сигнала. Отсчеты с выхода ПЗУ поступают на ЦАП. Ступенчатый сигнал с выхода ЦАП фильтруется в ФНЧ для сглаживания и подавления образов выходного спектра, повторяющихся с периодичностью f_{CLK}. (anti-aliasing filter). После регулировки по уровню он поступает на выход синтезатора.

Такая структура синтезатора имеет очевидные недостатки. Основным из них является неудовлетворительный способ перестройки частоты путем регулировки коэффициента деления частоты тактового генератора f_{CLK} в ДПКД . При этом шаг перестройки будет переменным в зависимости от требуемой величины частоты. Чем чем меньше коэффициент деления, тем больше относительная величина шага.

Кроме того, при перестройке выходной частоты будет меняться и частота дискретизации. Это затрудняет фильтрацию выходного сигнала, а также ведет к неоптимальному использованию скоростных характеристик ЦАП — они будут в полной мере использованы лишь на максимальной выходной частоте.

Другой метод регулировки частоты выходного сигнала, использовующий накапливающий сумматор с регистром («*аккумулятор фазы*») позволяет работать на постоянной частоте дискретизации, близкой к максимальной для используемого ЦАП. На каждом такте работы в регистр аккумулятора записывается предыдущее значение сумматора плюс шаг фазы M (код частоты). Чем больше шаг фазы, тем быстрее изменяется фаза, тем выше частота сигнала.



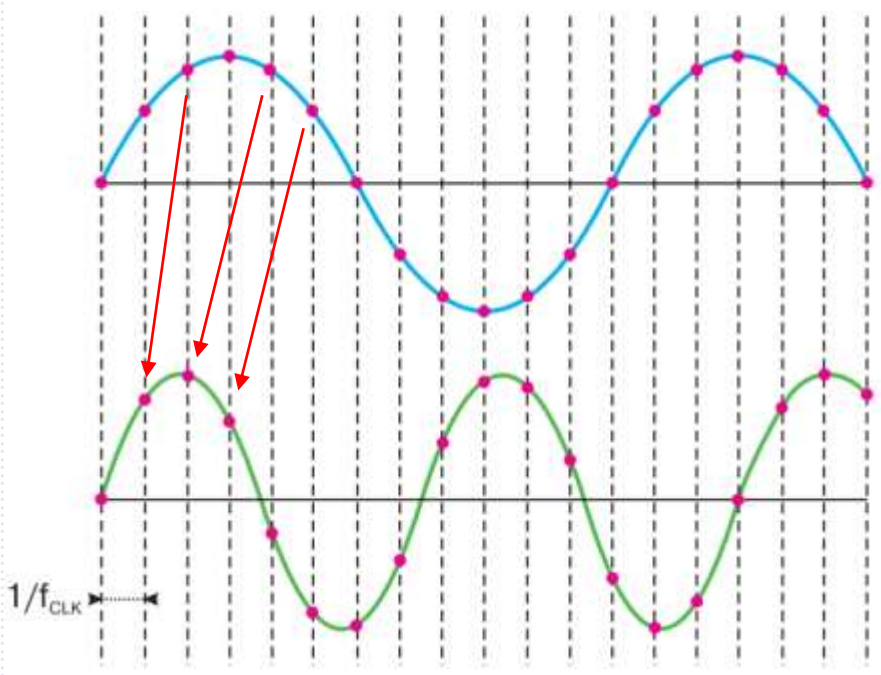
$$f_{вых} = \frac{M \cdot f_{CLK}}{2^N},$$

N- разрядность сумматора, определяющая шаг перестройки частоты

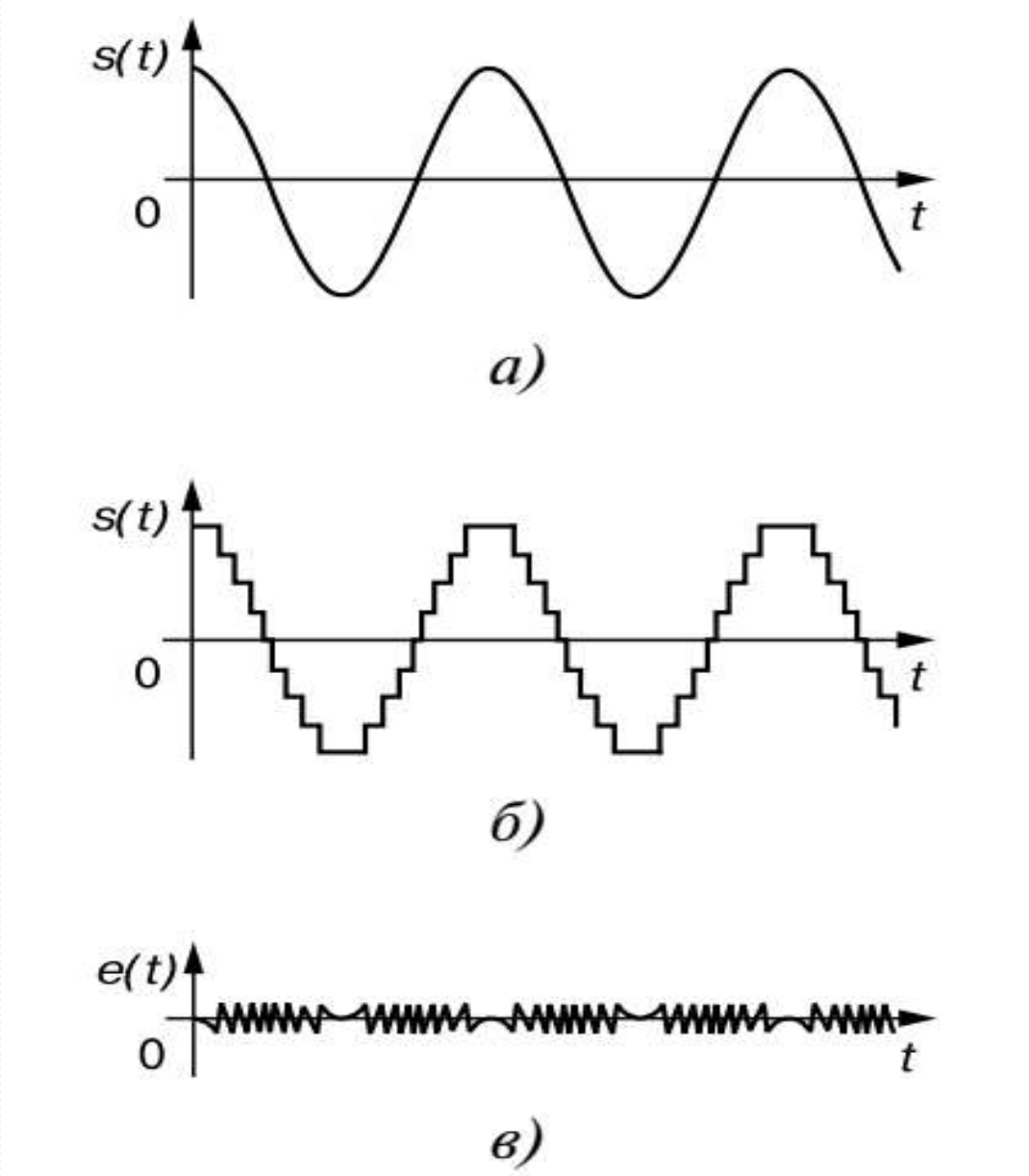
$$\Delta f_{вых} = \frac{f_{CLK}}{2^N}$$

Например, при тактовой частоте 50 МГц и разрядности N=32 шаг перестройки равен 11.65 мГц.

Для примера на графике два сигнала с M=1 и M=2 (отсчеты при M=2 берутся из ПЗУ через один, частота сигнала при этом в два раза выше). Частота отсчетов, поступающая на ЦАП при этом постоянна.



Неидеальность формы выходного сигнала DDS синтезатора



а) - идеал форма сигнала гармонической формы

(б) - вид сигнала на выходе ЦАП – он имеет вид ступенчатого образа желаемой функции

(в) - разность между идеализированной формой сигнала и его реализацией называется *шумом квантования*. Частота его равна частоте дискретизации

Амплитуда шума ЦАП зависит от разрядности N и составляет половину интервала квантования («ступеньки») Δ. Закон распределения шума равномерный с нулевым математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением $\text{СКО} = \sqrt{D} = \frac{\Delta}{\sqrt{12}}$

Оценка отношения сигнал/шум (SNR) по напряжению для гармонического сигнала с амплитудой U_m (с размахом $U_{p\text{-}p} = 2U_m$) и с количеством ступенек m:

$$m = 2U_{\text{m}}/\Delta = 2^N$$

Для с/ш по напряжению

$$\text{С/Ш} = \frac{U_m}{\text{СКО}} = \frac{U_m\sqrt{12}}{\Delta} = m\sqrt{3} = 2^N\sqrt{3}$$

$$(\text{С/Ш})_{\text{дБ}} = 20\lg(2^N \cdot \sqrt{3}) = (6.02N + 4.77)\ \text{дБ}$$

Для с/ш по мощности

$$(\text{С/Ш})_{дБ} = 10\lg\left(\frac{U_m^2/2}{\Delta^2/12}\right) = 10\lg\left(\frac{U_m^2/2\cdot 2^{2N}}{4U_m^2/12}\right) = (6.02N + 1.76)\ дБ$$

Для малых шумов квантования используют ЦАП с разрядностью 14..16 и выше. Главный источник фазовых шумов – генератор тактовой частоты.

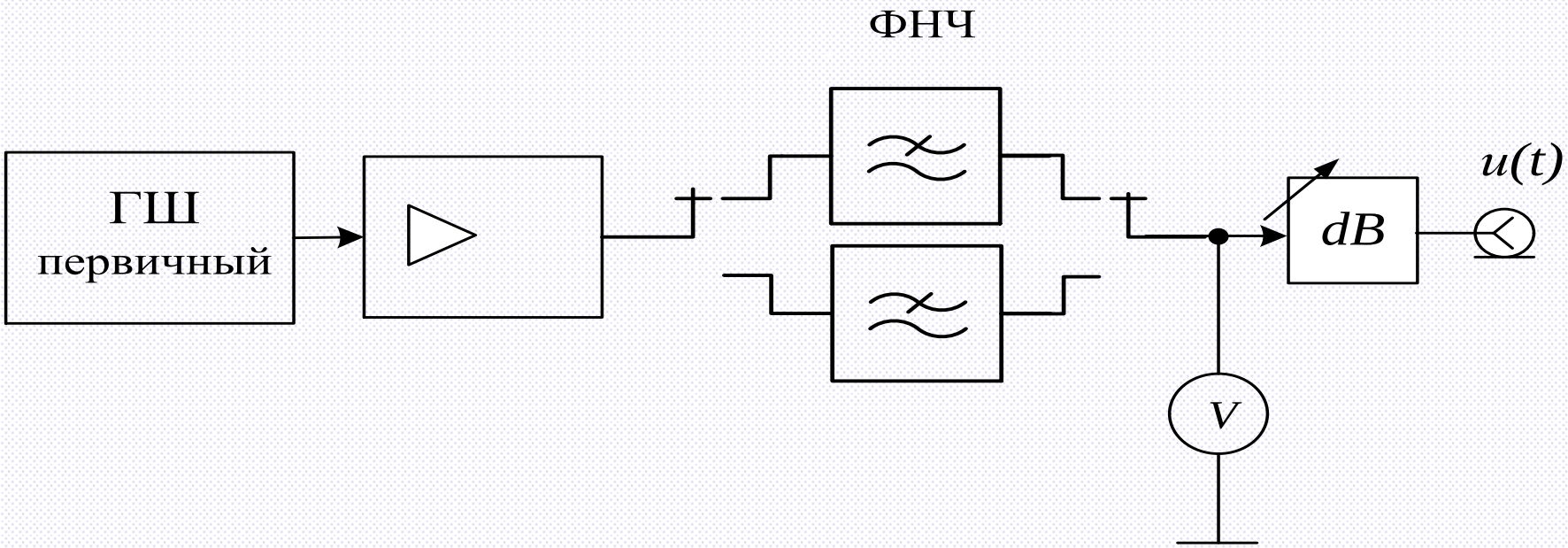
Для получения неискаженной формы ВЧ сигналов малой длительности и высокой частоты повторения требуется частота дискретизации **в 5..10 раз выше** максимальной частоты *спектра сигнала!!*. Обычно в паспорте прибора указывают верхнюю рабочую частоту генератора **для *гармонического* сигнала**, у которого максимальная частота спектра равна самой частоте сигнала. . Для сложных сигналов она может быть в разы меньше.

Длительность периода сигнала при заданной частоте дискретизации ограничена размером памяти ПЗУ, в которую записаны выборки мгновенных значений. Стабильность частоты соответствует стабильности опорного генератора. Синтезатор DDS обеспечивает очень высокое разрешение по частоте и фазе, быструю перестройку на другую частоту без разрыва фазы. Синтезаторы DDS практически не подвержены температурному дрейфу и старению. Единственным элементом, который обладает присущей аналоговым схемам нестабильностью, является ЦАП.



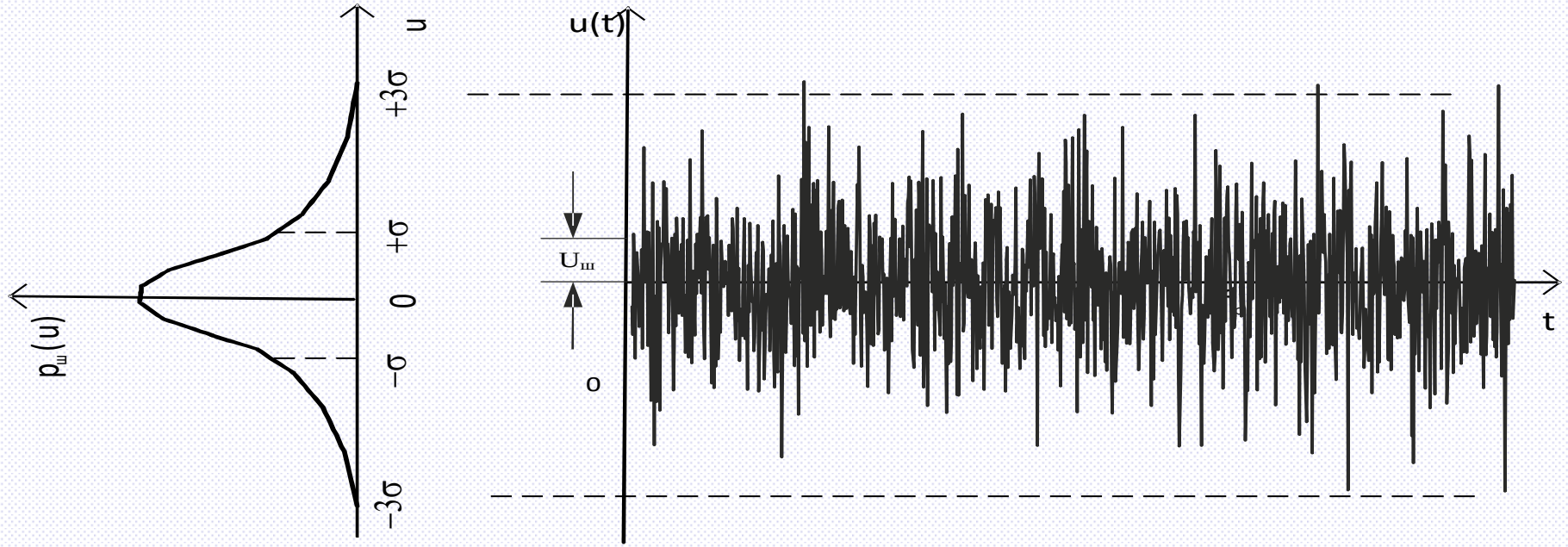
Пример: цифровой DDS генератор 33220A фирмы Keysight (Agilent) использует 14-битовое кодирование со скоростью до 50 Мвыб/с при длине сигнала в 64 К точек. Рабочий диапазон частот гармонического сигнала от 1 мкГц до 20 МГц с цифровой установкой частоты и ее контролем по встроенному цифровому частотомеру. КНИ гармонического сигнала не хуже 0.04%.Прибор вырабатывает 10 стандартных форм сигналов и сигналы произвольной формы. Для импульсных сигналов частота до 5 МГц, длительность фронта не более 13 нс. Имеется возможность реализовать различные виды модуляции выходного сигнала (AM, FM, PM, FSK и PWM) с частотой модуляции до 20 кГц, есть режим свиппирования по частоте (ГКЧ).

Измерительные генераторы шума



Генераторы шумовых сигналов (или *генераторы шума*- ГШ **)** вырабатывают случайные сигналы с нормированными статистическими параметрами.

- выходное напряжение ГШ близко по структуре к реальным сигналам исследуемых радиоэлектронных устройствах
- спектральная характеристика шумового сигнала может быть равномерна в широком диапазоне частот (вплоть до СВЧ)
- сигнал ГШ позволяет оценить влияние на исследуемое устройство внутренних и внешних случайных помех



Основной узел ГШ – первичный источник шума (задающий ГШ) . Его сигнал должен иметь достаточно большой уровень напряжения в требуемой полосе частот и описываться нормированными вероятностными характеристиками:

- Законом распределения вероятностей;
- Корреляционной функцией;
- Дисперсией или среднеквадратическим отклонением.

Обычно первичный источник вырабатывает случайный сигнал, имитирующий белый шум с нормальным распределением.

Основные типы первичных источников шума:

Нагретый проволочный резистор. спектральная плотность мощности шума (СПМШ) резистора на согласованной нагрузке при комнатной температуре $T_0=290^0K$ равна $S(f) = kT_0 = 4\cdot10^{-21}$ Вт/Гц (-174 дБм/Гц), напряжение теплового шума в полосе 1 Гц на стандартном резисторе 50 Ом равно $9\cdot10^{-4}$ мкВ (или -61 дБмкВ, -168 дБм). Практический источник теплового шума – **болометр** – стеклянный балон с вольфрамовой нитью 8-20 мкм.

Вакуумные шумовые диоды. Для получения шумового напряжения используется явление дробового эффекта - неравномерного во времени вылета электронов с поверхности накаленного катода. Диод в режиме насыщения – отсутствие пространственного заряда дает стабильность шумовой мощности при заданном токе. Шумовой спектр ограничен частотами 300..500 МГц.из-за емкости электродов

Газоразрядные источники шума - в виде стеклянной трубки, наполненной инертным газом (аргоном или неоном). На одном конце трубки расположен прямонакальный или подогреваемый катод, на противоположном — анод. Свойство газоразрядных трубок генерировать шумы обусловлено колебаниями электронов в плазме газового разряда. Имеют высокую равномерность уровня спектральной плотности (порядка 60..80 kT0) , широкий частотный диапазон. Громозки, требуют высоких напряжений.

Полупроводниковый шумовой диод – это стабилитрон, который работает в начальном участке лавинного пробоя при малом обратном токе. Характеризуют шумовой диод коэффициентом избыточного шума (ENR - **Excess noise ratio**). Когда диод обесточен, шум от него будет тепловым. Когда диод включен (запитан), шум от него будет выше из-за избыточного коэффициента шума диода. Так измеряют коэффициент шума усилителей методом Y-фактора.

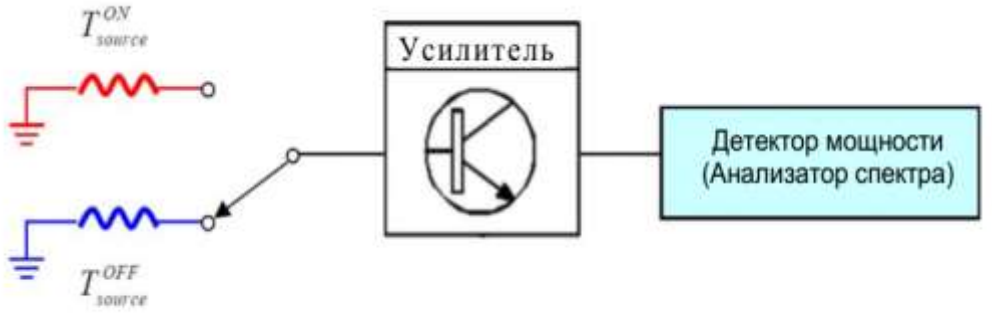


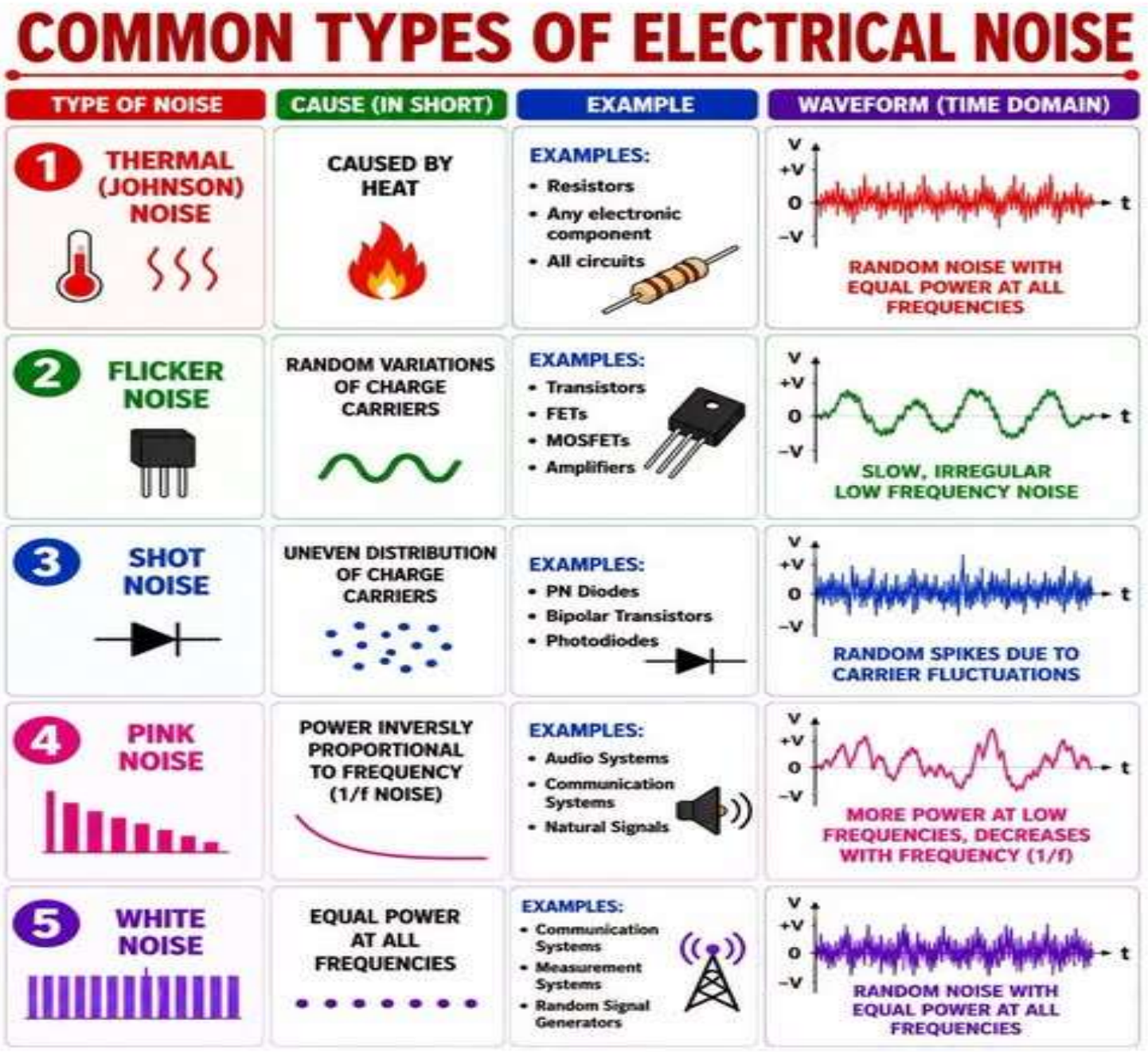
Рисунок 3 – Переменные метода Y-фактора для измерения коэффициента шума.

Технические характеристики диодов диапазонов РЧ и СВЧ

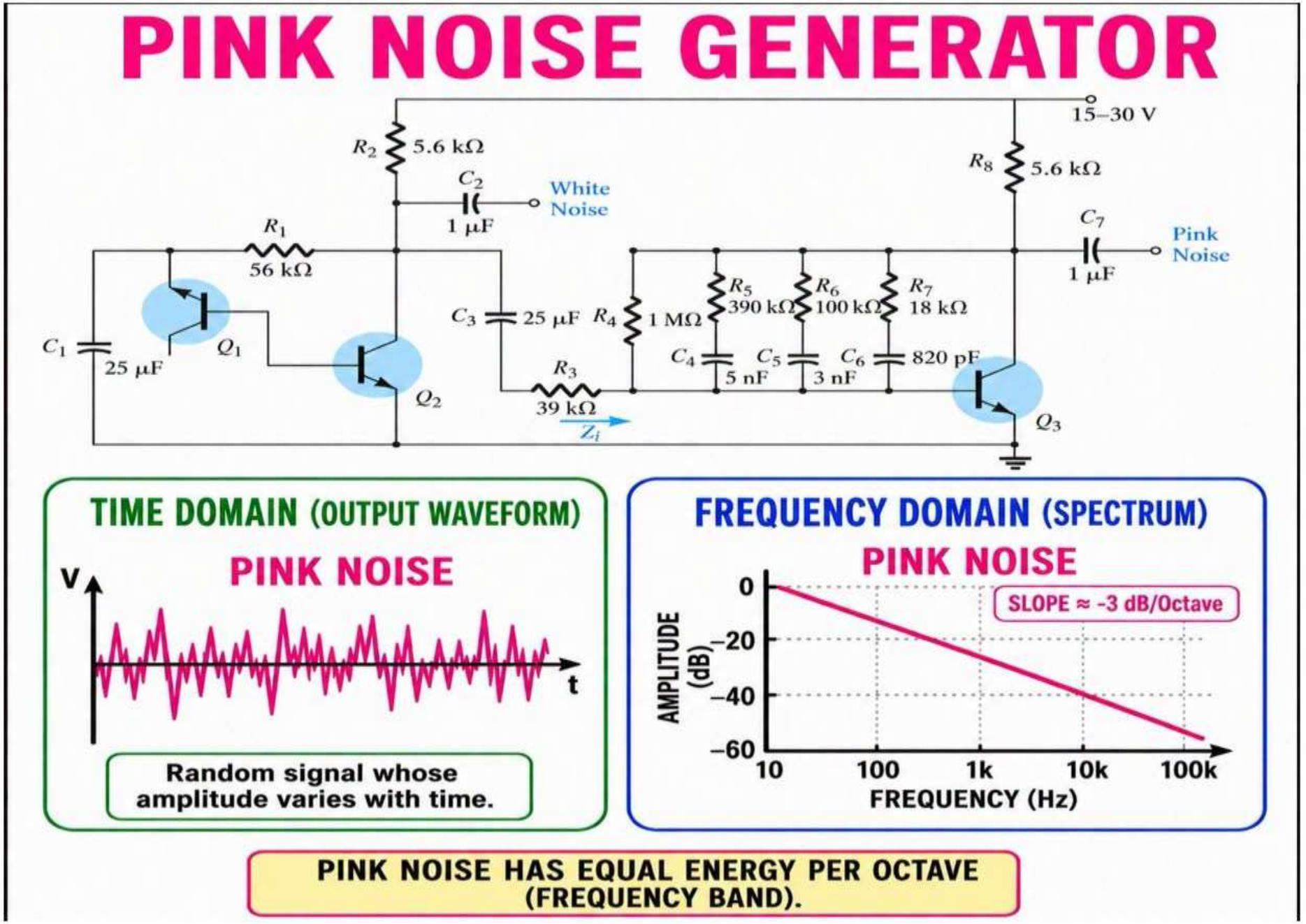
Модель	Диапазон частот	Рабочие характеристики			Выход	Корпус
		V_b, В	I_{op}, мА	R_L, Ом	ENR, дБ	
NC302L	10 Гц...3 ГГЦ	6...8	6	50	30...35	DO-35, BL, CH-1
NC303	10 Гц...8 ГГЦ	8...12	8	50	30...35	DO-35, BL, CH-1
NC303SOT	10 Гц...8 ГГЦ	8...10	8	50	30...35	SOT323
NC305	10 МГц...11 ГГЦ	8...12	10	50	29...34	BL, CH-1
NC401	100 МГц...18 ГГЦ	8...12	10	50	30...35	C10, C50H, CH-2
NC403	100 МГц ...27 ГГЦ	8...12	12	50	24...28	C50, CH3
NC404	18 ГГц...50 ГГЦ	8...12	15	50	20...25	C50, CH3
NC405	18 ГГц...75 ГГЦ	8...12	20	50	15...25	C50, CH3
NC406	18 ГГц...110 ГГЦ	8...12	25	50	15...25	C50, CH3

Дробовой шум (shot noise) связан с дискретностью носителей заряда. Спектральная плотность равномерна, не зависит от температуры. Проявляется в виде случайных всплесков тока, которые накладываются на основной сигнал..

Фликкер-шум возникает в результате генерации и рекомбинации носителей заряда в транзисторах. Зависит от температуры. Спектральная плотность обратно пропорциональна частоте



Источник шума – p-n переход транзистора Q1. Генератор формирует «белый» шум на выходе транзистора Q2, «розовый» шум со спадом спектра -3 дБ / на октаву на выходе транзистора Q3



Генераторы шума серии АКИП-3501

Группа приборов в линейке средств измерений : источники-имитаторы аналогового шума серии АКИП-3501 (3 модели). Приборы предназначены для использования в качестве источника электрического шумового сигнала с равномерным спектром и нормальным распределением мгновенных значений напряжения. Генераторы шума АКИП-3501 могут применяться при отладке систем спутниковой связи для моделирования шума, например, с целью получения соответствующие значения параметра «сигнал / шум» (SNR), а также для имитации гауссовского белого шума в области СВЧ-радиосвязи и моделирования РЭА.

Технические данные генераторов шума :

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ	АКИП-3501/1	АКИП-3501/2	АКИП-3501/3
Диапазон частот	15 МГц – 415 МГц	800 МГц – 1500 МГц	300 МГц – 1800 МГц
Макс. выходная мощность	> 2 дБм	≥ - 3,0 дБм	≥ 0 дБм
Диапазон ослабления	0 – 25 дБ	0 – 30 дБ	0 – 30 дБ
Шаг регулировки уровня	0,1 дБ	1 дБ	0,5 дБ
Нелинейность	≤ 2 дБ	≤ 2 дБ	< 3 дБ (300 МГц – 1 ГГц) < 3,5 дБ (1 ГГц – 1,7 ГГц)
Импеданс	50 Ом	50 Ом	50 Ом





Генератор шума ПУЛЬСАР относится к средствам активной защиты информации от утечки за счет побочных электромагнитных излучений в диапазоне частот
от 10 кГц до 3 ГГц

Генератор шума АКИП-3501





СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!







Факультет радиотехники и телекоммуникаций,
Кафедра Теоретических основ радиотехники

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ” им. В. И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ)

http://kepstr.eltech.ru/tor/ptri

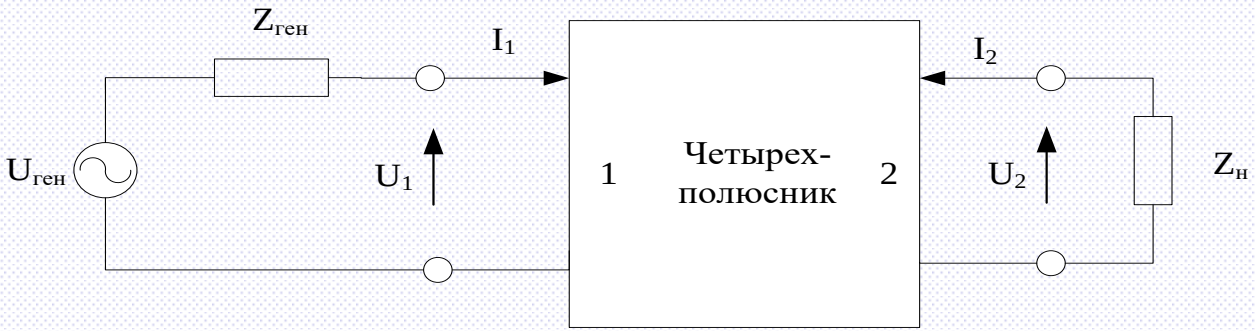
А.А. Данилин

«Приборы и техника радиоизмерений»
(электронный конспект лекций)

Измерение АЧХ

Санкт-Петербург
2024 г.

Амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики устройств (АЧХ и ФЧХ)



$$K(f)=\frac{\dot{U}_{m2}}{\dot{U}_{m1}}=\frac{U_{m2}}{U_{m1}}\exp(\varphi_2-\varphi_1)$$

Коэффициент передачи **четырехполюсника** по напряжению - отношение комплексных амплитуд напряжений на выходе и входе

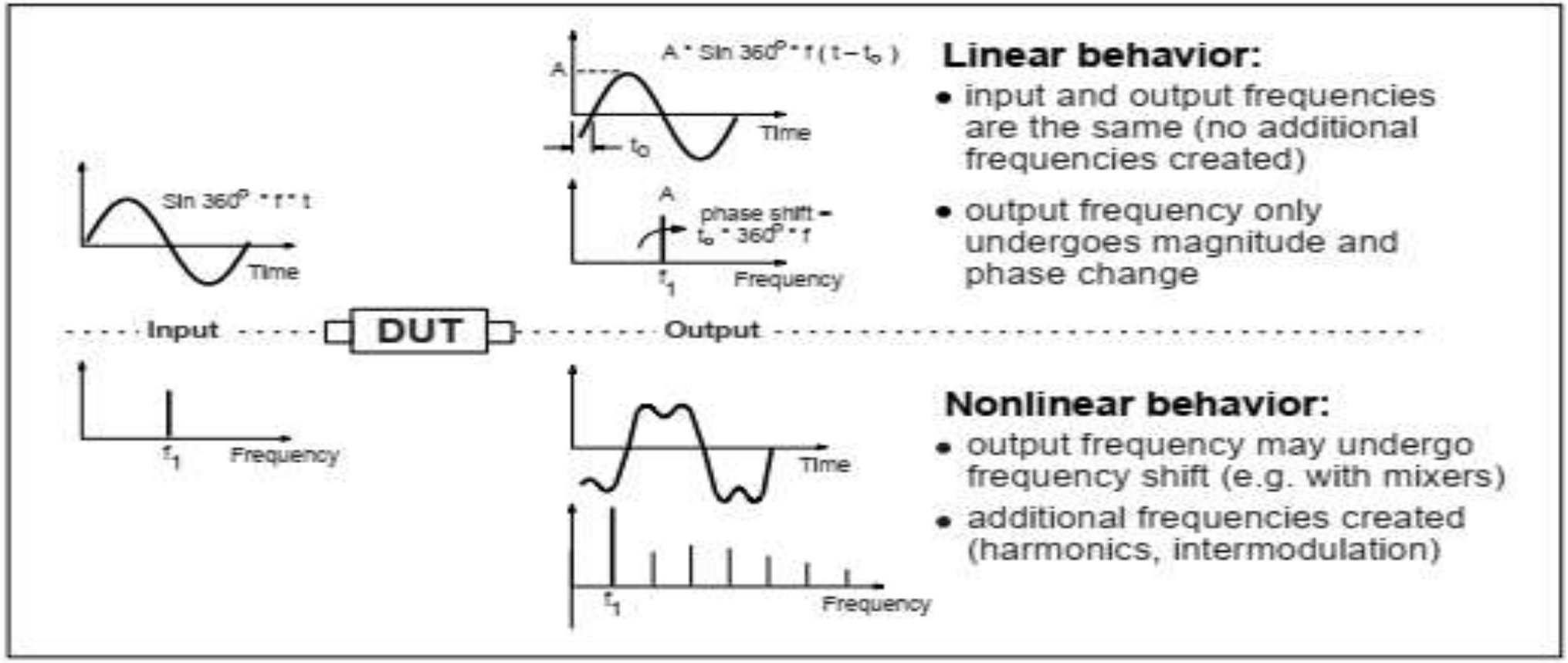
$$АЧХ=|K(f)|$$

$$ФЧХ=\arg(K(f))$$

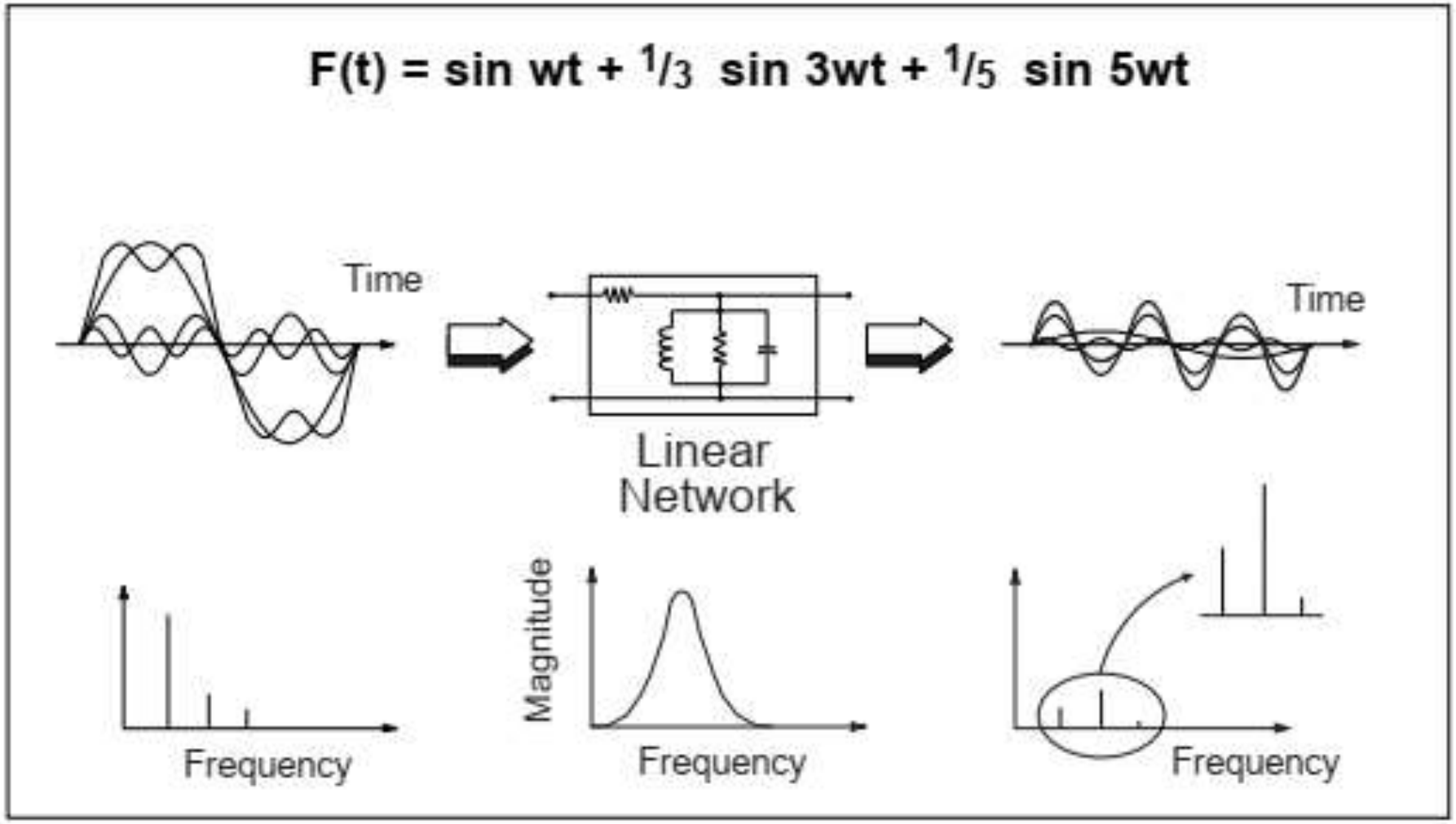
$$Z(f)=\left(\frac{\dot{U}m}{\dot{I}\,\mathrm{m}}\right)=\frac{1}{Y(f)}$$

Двухполюсное устройство описывается «иммитансами» - полным сопротивлением (импедансом) или полной проводимостью (адмиттансом)

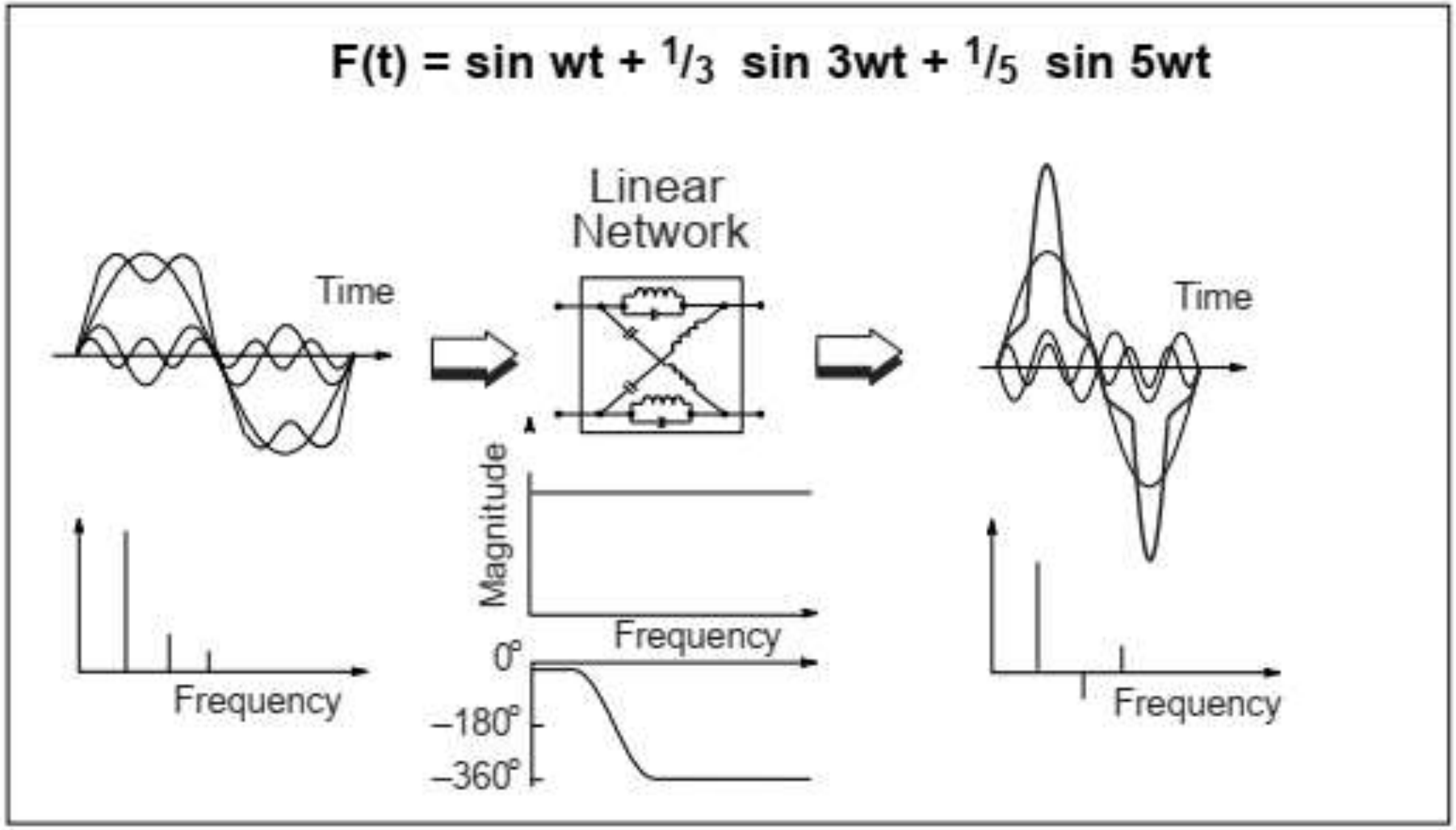
Влияние коэффициента передачи на форму выходного сигнала



Линейное устройство ***не меняет*** частоту гармонического сигнала – меняет только амплитуду и фазу. Нелинейное порождает новые частоты и ***меняет форму*** гармонического сигнала. Для него не подходит понятие АЧХ и ФЧХ.



Узкополосный линейный фильтр меняет амплитуды (и фазы) гармоник меандра и искажает форму сложного сигнала на выходе (**линейные искажения**)



ФЧХ линейной цепи даже при **постоянной АЧХ** меняет форму сигнала

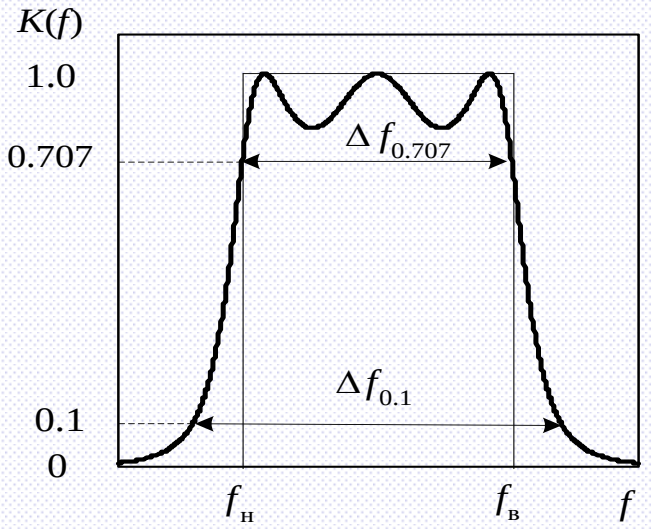
(неминимально-фазовые цепи – фазовые корректоры)

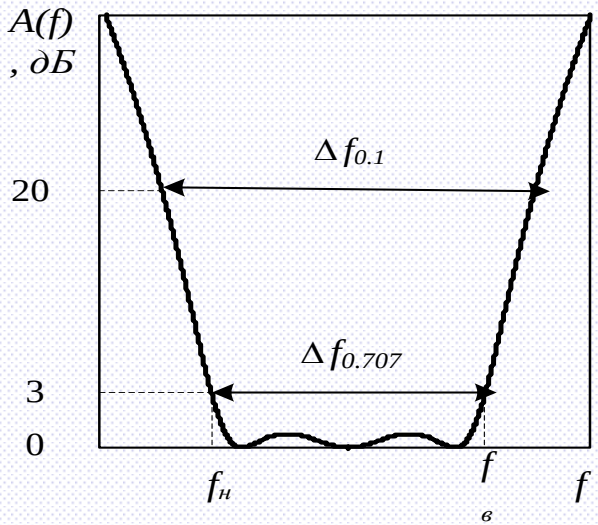
Пример: измерение АЧХ и параметров полосно-пропускающего фильтра (ППФ)

Типичные АЧХ полосно-пропускающего фильтра:

а – в линейном масштабе;

б – в логарифмическом масштабе по уровню (ослабление или затухание фильтра)





$$A(f) = 10 \lg\left(\frac{P_{вх}}{P_{вых}}\right) = -20 \lg\left(\left|K(f)\right|\right), дБ$$

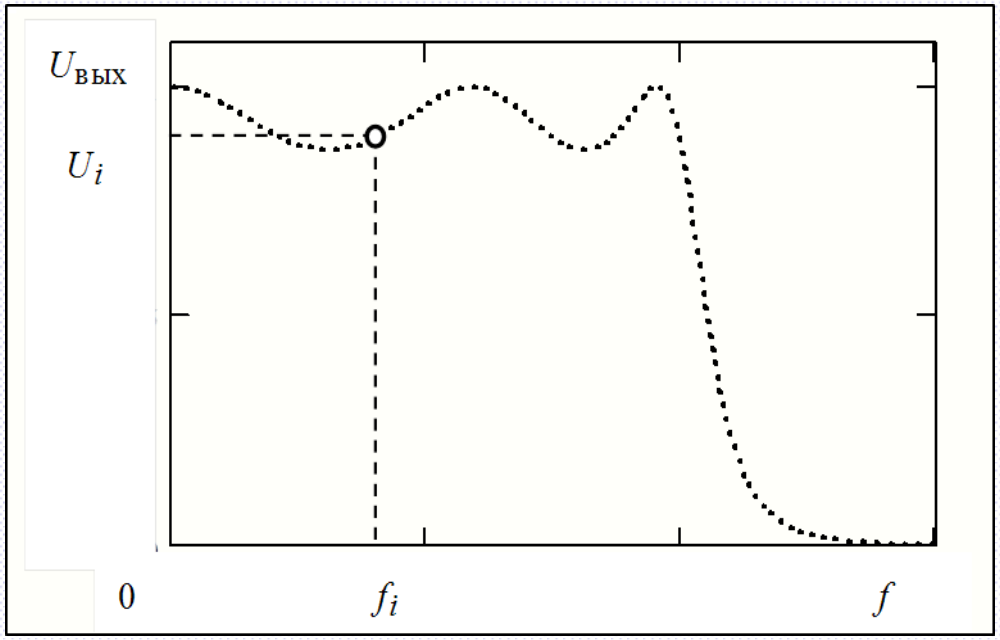
Близость АЧХ к прямоугольной – **коэффициент прямоугольности**

$$K_{п} = \Delta f_{0,707} / \Delta f_{0,1}$$

Иногда используют обратную величину - коэффициент формы АЧХ (**shape factor**)

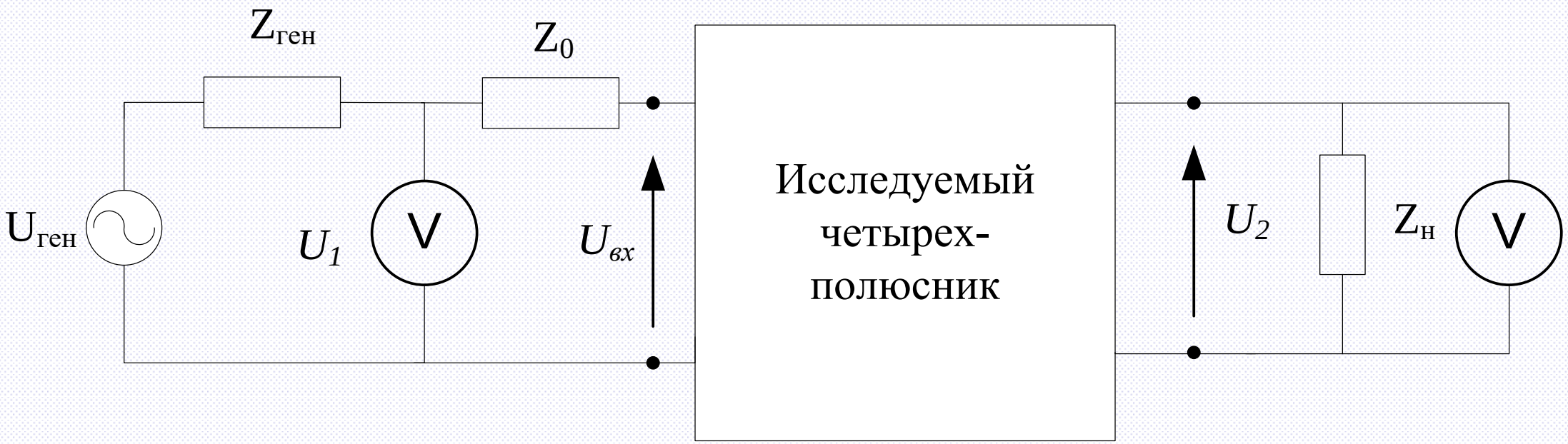
Измерение АЧХ в дискретных точках с *одним вольтметром*





Измеряют АЧХ как *зависимость амплитуды напряжения на выходе* исследуемого устройства от частоты ***при постоянной амплитуде Uген***. Используют генератор гармонических колебаний с ***известным*** (стандартным) внутренним сопротивлением *Z*ген **(«метод известного генератора»).**

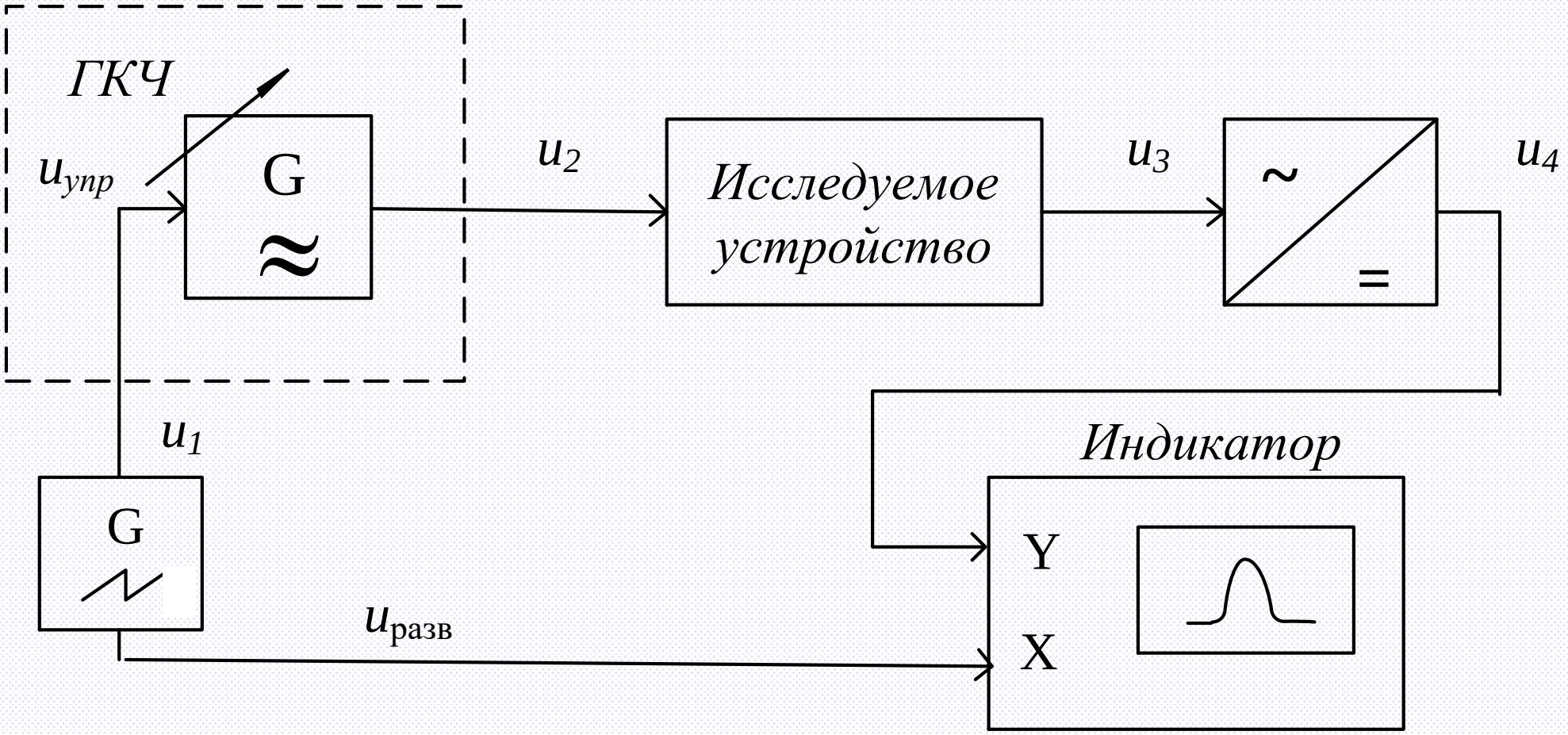
Измерение АЧХ четырехполюсника по точкам с помощью двух вольтметров



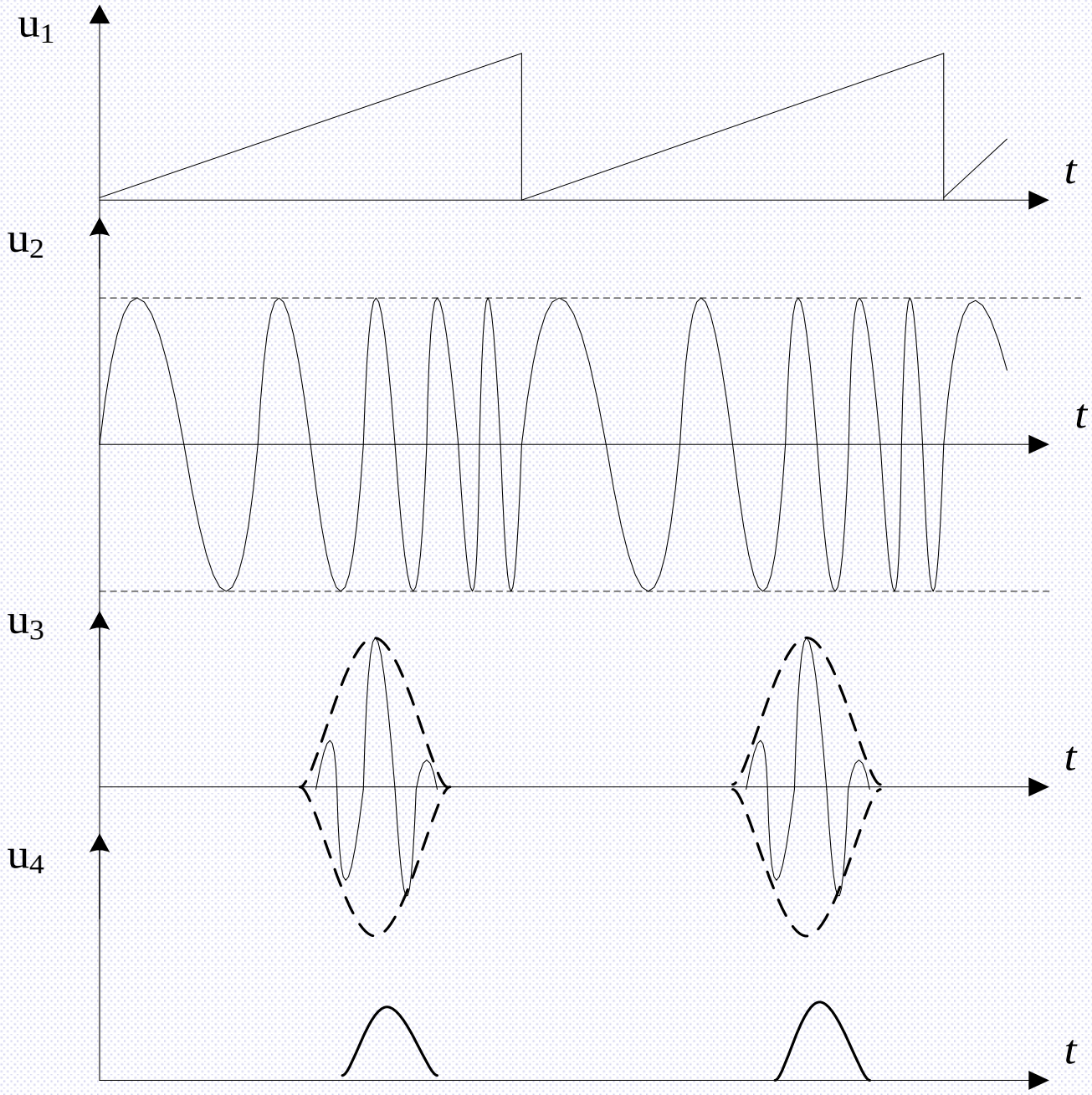
Z0 – эталонный резистор с заданным сопротивлением источника сигнала.

АЧХ есть отношение амплитуд напряжений U_2 и U_1. Такой способ измерения называют **«метод *Z*»** – его используют при измерении АЧХ с высокой точностью

Панорамный метод измерения АЧХ



Приборы, реализующие панорамный метод - *измерители АЧХ* (группа Х1 по ГОСТ).



Осциллограммы сигналов в панорамном измерителе АЧХ:

u1 - напряжение развертки

u2 - ЛЧМ сигнал на выходе ГКЧ (и на входе исследуемого устройства)

u3 - осциллограмма выходного сигнала исследуемого устройства

u4 - огибающая выходного сигнала (сигнал с выхода детектора)

Условия неискаженного воспроизведения формы АЧХ на экране панорамного измерителя:

- Линейность закона частотной модуляции ГКЧ (зависимость частоты ГКЧ от управляющего напряжения развертки $u_p(t)$.

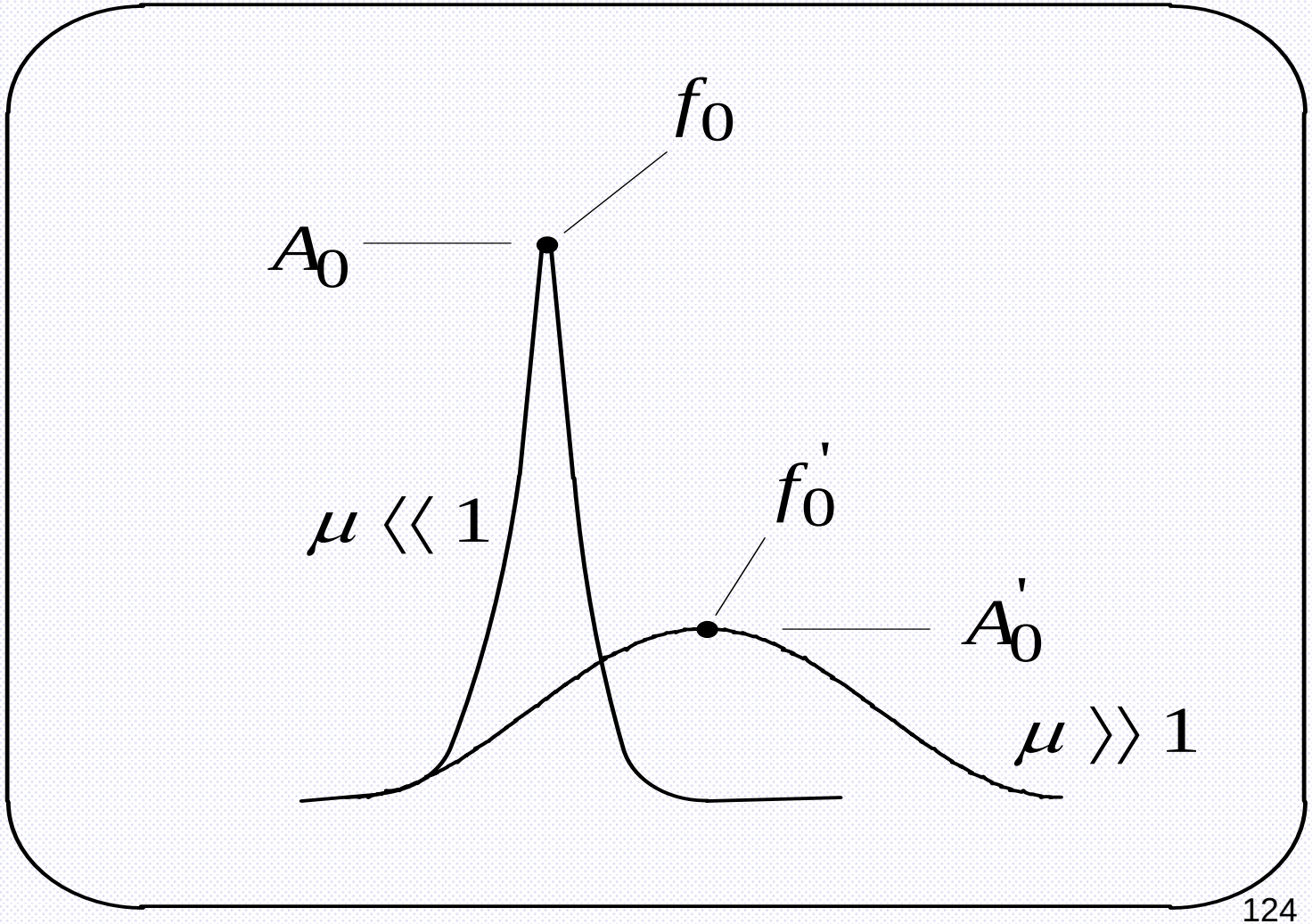
$$f_{гкч}(t) = f_н + (f_к - f_н) \cdot \frac{u_p(t)}{Up_{max}}$$

  Определяет равномерность *оси част*от по горизонтали экрана.

- Линейность детектора. Она обеспечивает постоянство коэффициента отклонения луча по вертикали экрана.
- Постоянство амплитуды ГКЧ в диапазоне качания частоты. Зависимость выходной амплитуды ГКЧ от частоты называют *собственной АЧХ* измерителя.
- Минимальные динамические искажения изображения АЧХ.

Динамические искажения на экране панорамного измерителя АЧХ

При быстром изменении частоты в узкополосных устройствах возникает длительный переходный процесс. Амплитуда выходного сигнала уже не будет пропорциональна АЧХ в каждой частотной точке.



ПРИМЕР: Динамические искажения в одиночном резонансном контуре.

Частота ГКЧ меняется от начальной частоты *f*н до конечной *f*к по линейному закону. Время анализа АЧХ равно периоду развертки *T*р.

Скорость изменения частоты :

$$\nu_f = \frac{f_к - f_н}{T_р}$$

Полоса пропускания контура по уровню 0,707 Δf связана с добротностью соотношением

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f}$$

Постоянная времени контура (время затухания огибающей импульсной реакции в *e* = 2.73 раза) равна

$$\tau_к = \frac{2Q}{\omega_0} = \frac{Q}{\pi \cdot f_0} = \frac{1}{\pi \cdot \Delta f}$$

Коэффициент динамических искажений **μ** равен отношению постоянной времени контура и времени пребывания частоты ГКЧ в пределах полосы пропускания:

$$\tau_0 = \frac{\Delta f}{\nu_f} = \frac{\Delta f \cdot T_р}{f_к - f_н}$$

$$\mu = \frac{\tau_к}{\tau_0} = \frac{f_к - f_н}{\pi(\Delta f)^2 T_р}$$

Считается допустимыми искажения кривой при $\mu \le 0{,}1$

Условие получения неискаженной АЧХ контура:

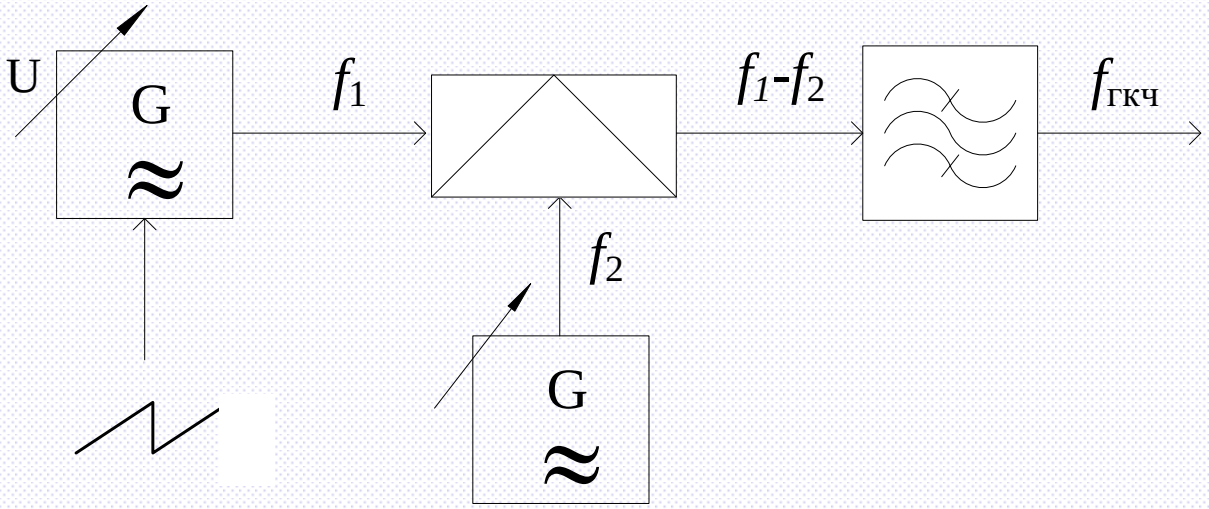
$$T_{\text{р}} \ge \frac{f_{\text{к}} - f_{\text{н}}}{0.1\pi(\Delta f)^2}$$

Искажения кривой АЧХ одиночного контура проявляются в:

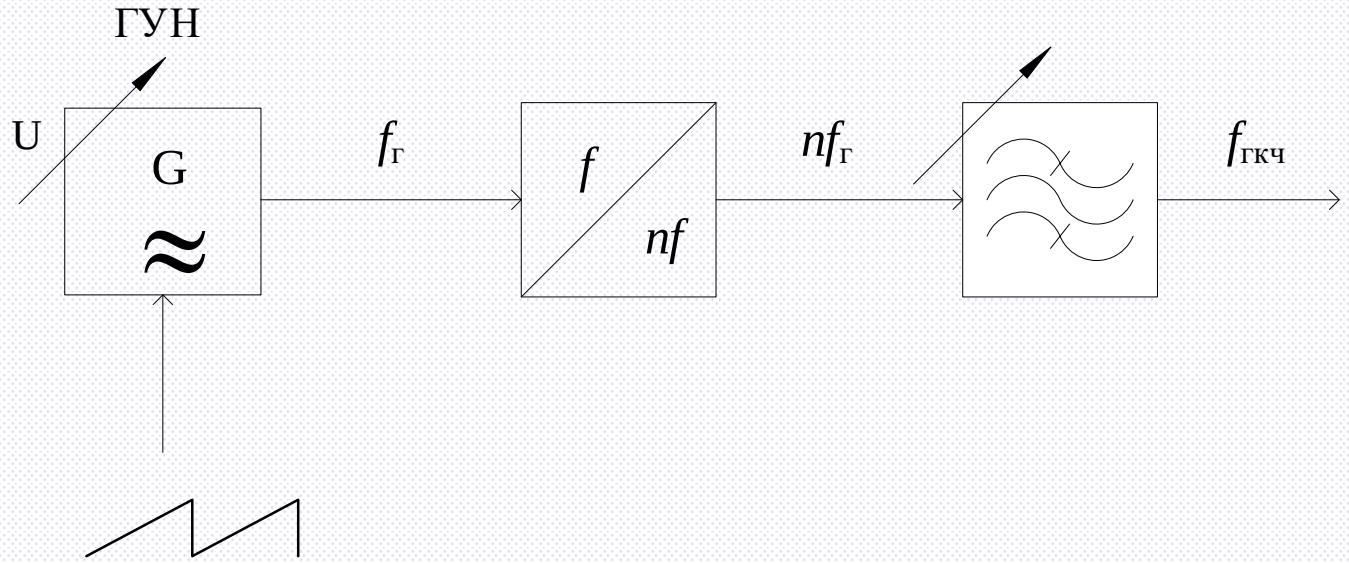
- смещении вершины АЧХ $\frac{f_0' - f_0}{f_0} \approx 1{,}27 \cdot \mu$
- снижении ее уровня $\frac{A_0' - A_0}{A_0} \approx -0{,}42 \cdot \mu^2$
- расширении кривой на уровне 0,707 $\frac{\Delta f' - \Delta f}{\Delta \text{f}} \approx 1{,}04 \cdot \mu^2$

Устройство панорамных измерителей АЧХ

ГКЧ с преобразованием частоты



ГКЧ с преобразованием частоты **вниз** – применяют для НЧ измерителей.



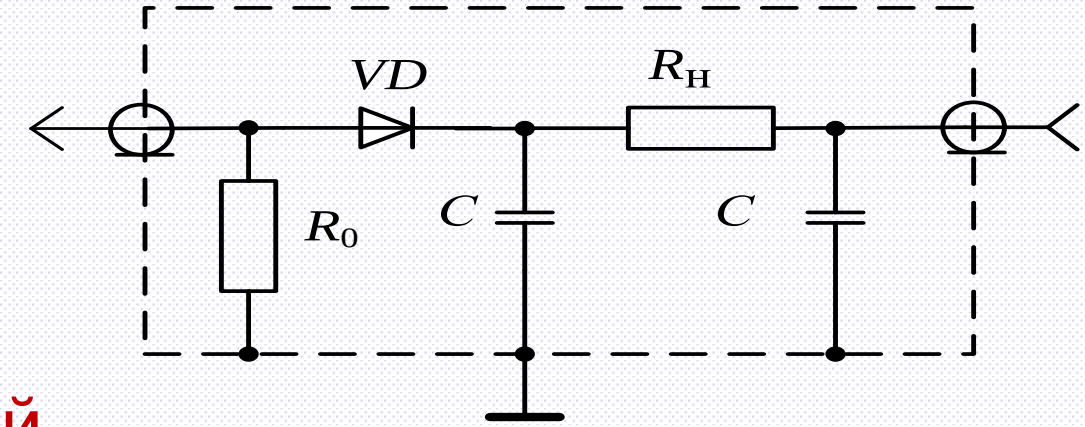
ГКЧ с умножением частоты – применяют для диапазонов ВЧ и СВЧ

Детекторные ВЧ головки измерителей АЧХ:

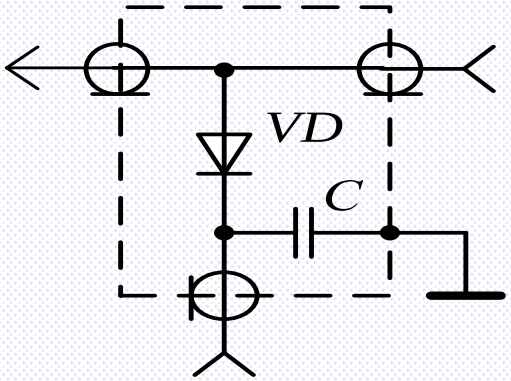
а – согласованная;

б – проходная;

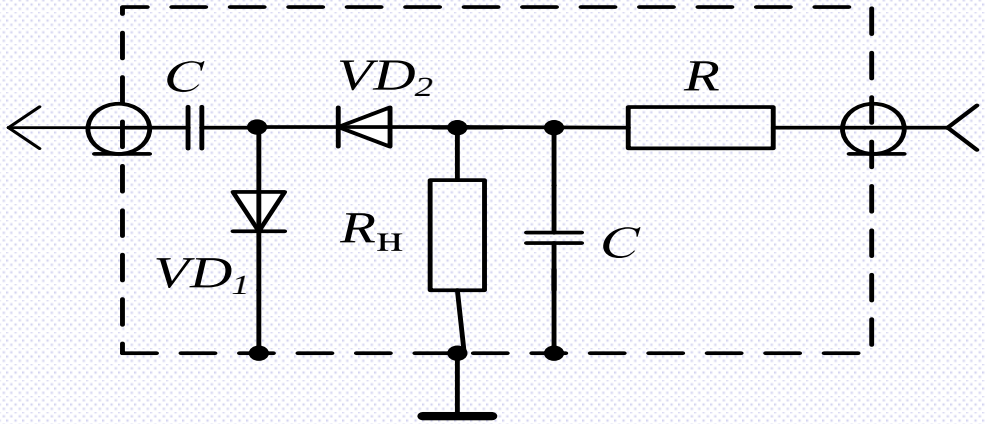
в – высокоомная



а



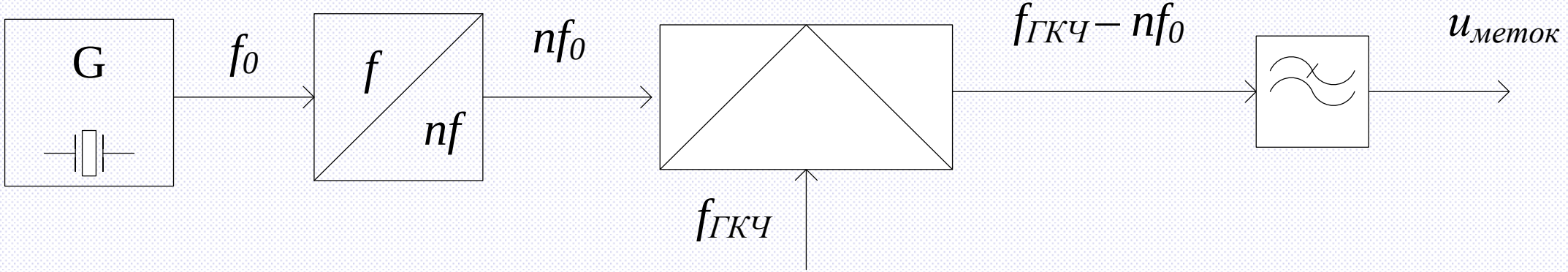
б

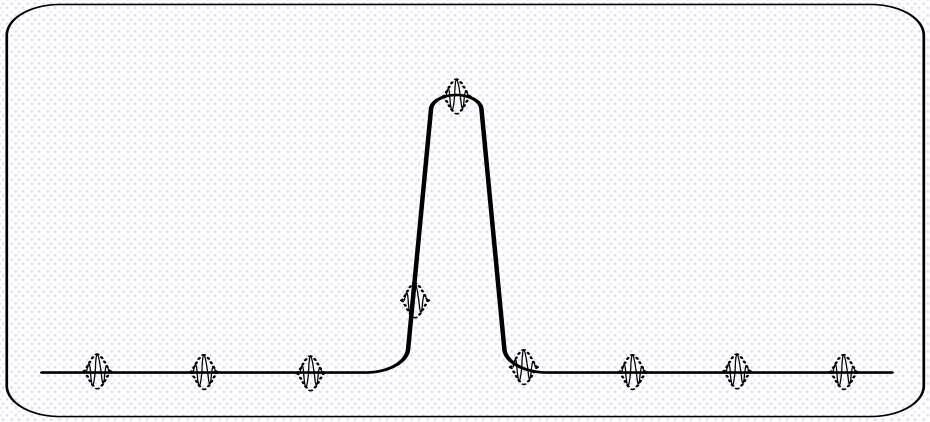


в

Методы измерения значений АЧХ в панорамных приборах

Измерение уровня АЧХ: метод калиброванных шкал. Калибровка шкалы – по уровням 0 и 1. Измерение частоты точек АЧХ: метод равноотстоящих частотных меток и метод стоп-метки.

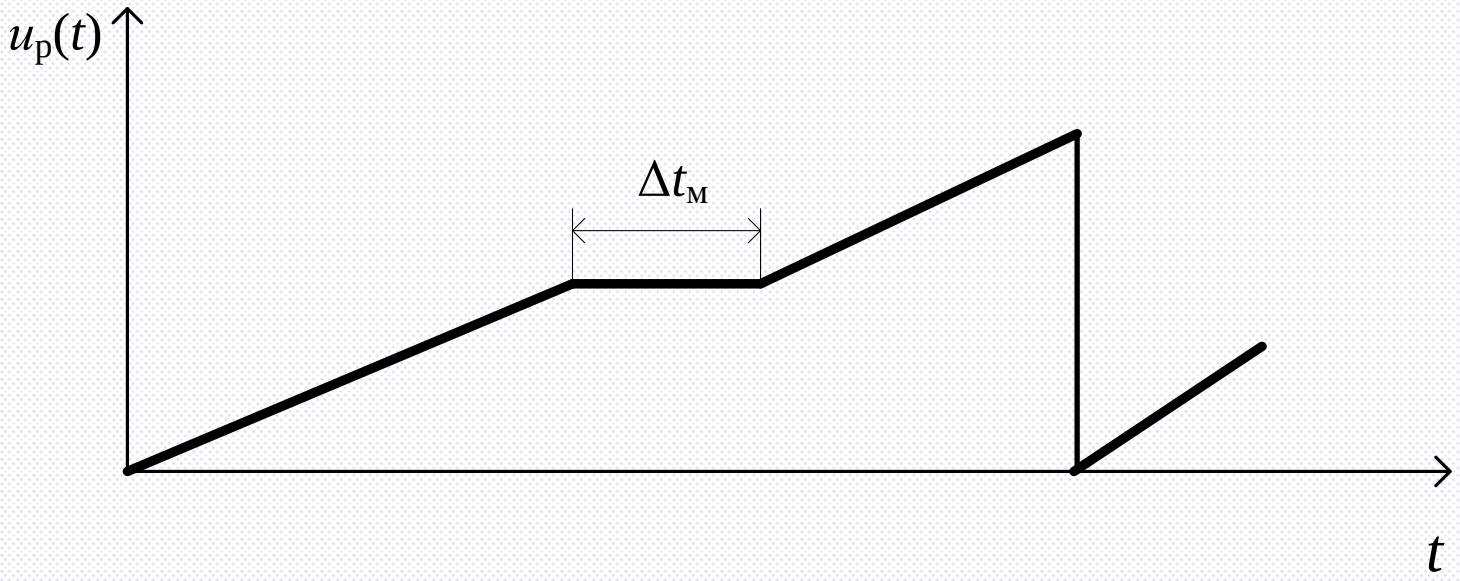


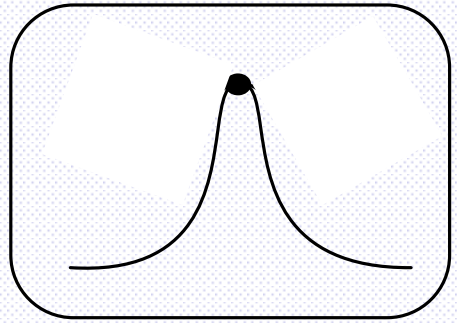


Генератор равноотстоящих частотных меток:

а – структурная схема; *б* – вид АЧХ с частотными метками

Измерение частоты в отдельных точках АЧХ с использованием стоп-метки.





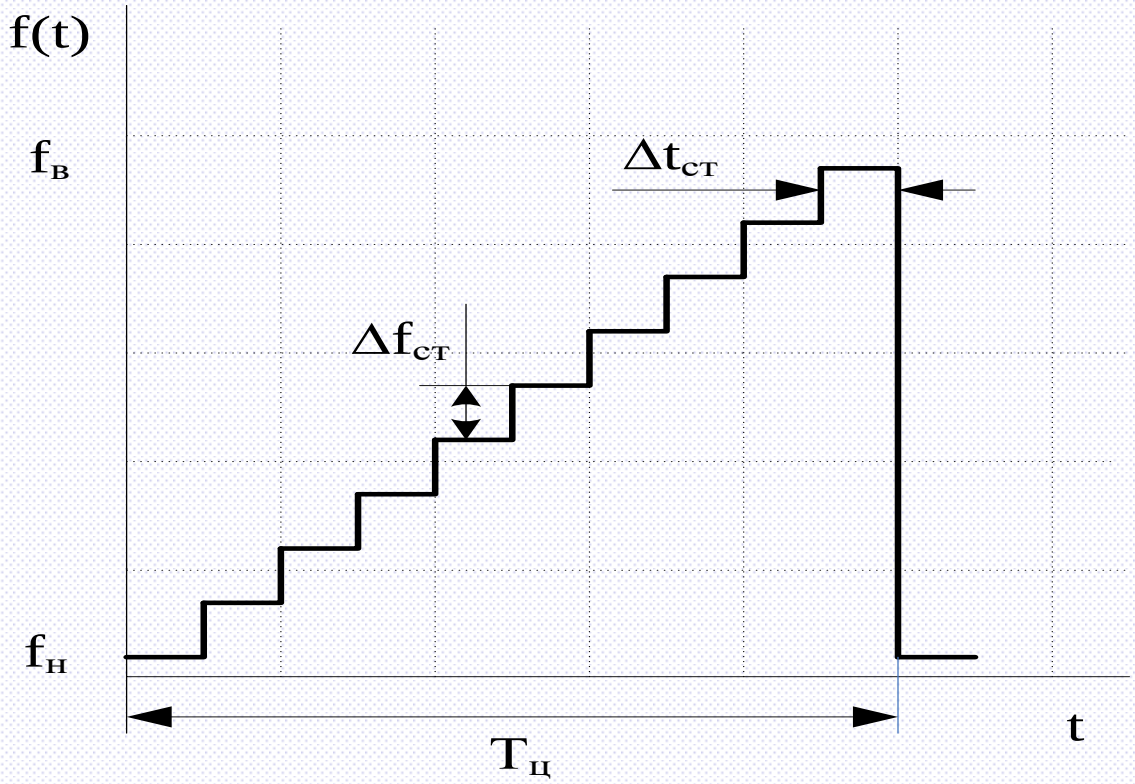
Преимуществом метода стоп-метки является высокая точность измерения частоты, недостатком – увеличение времени измерения АЧХ.

В точке остановки частоты отсутствуют динамические искажения, что позволяет определять точное значение как частоты, так и уровень АЧХ

Основные параметры панорамных измерителей АЧХ

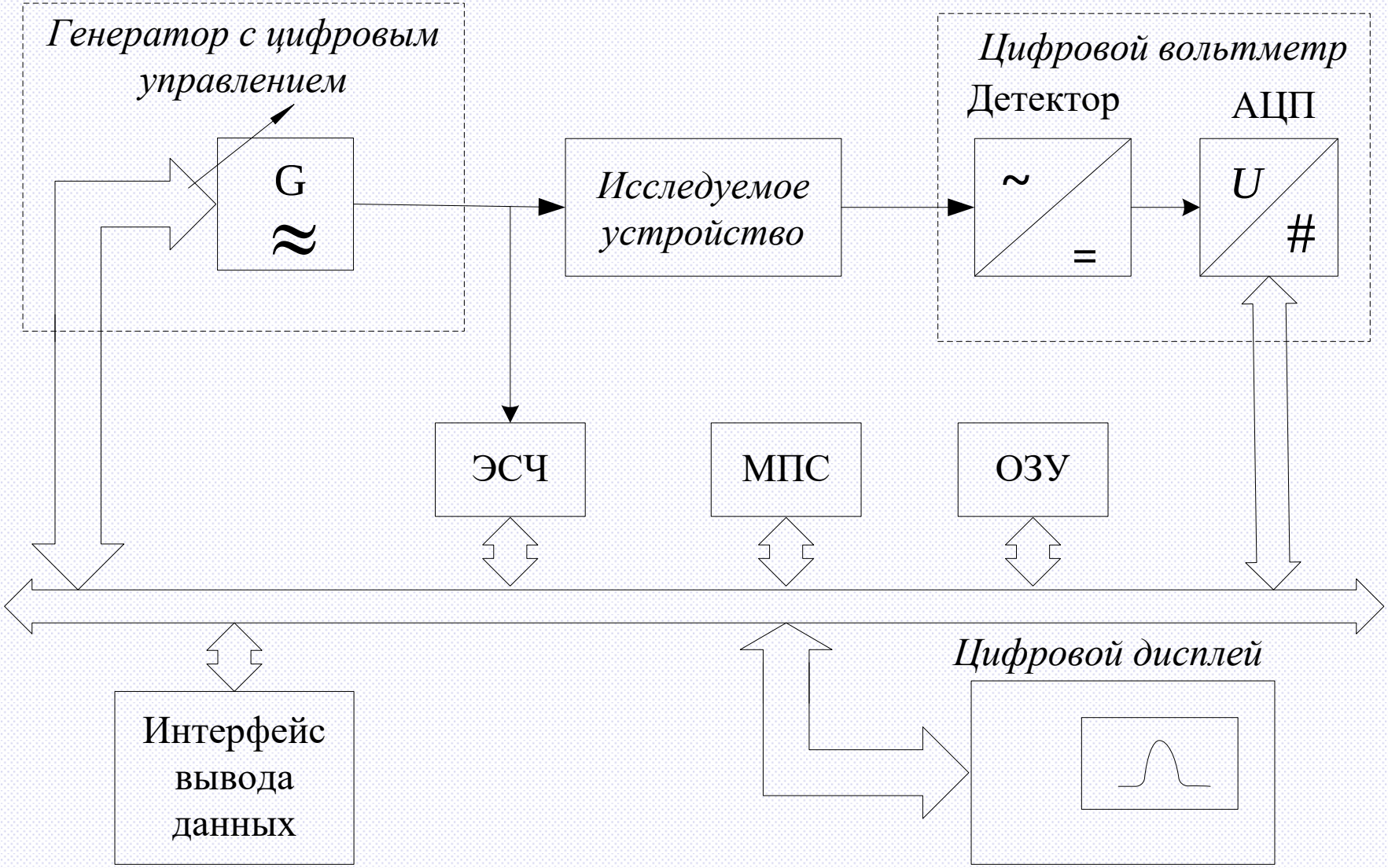
Микропроцессорные цифровые измерители АЧХ

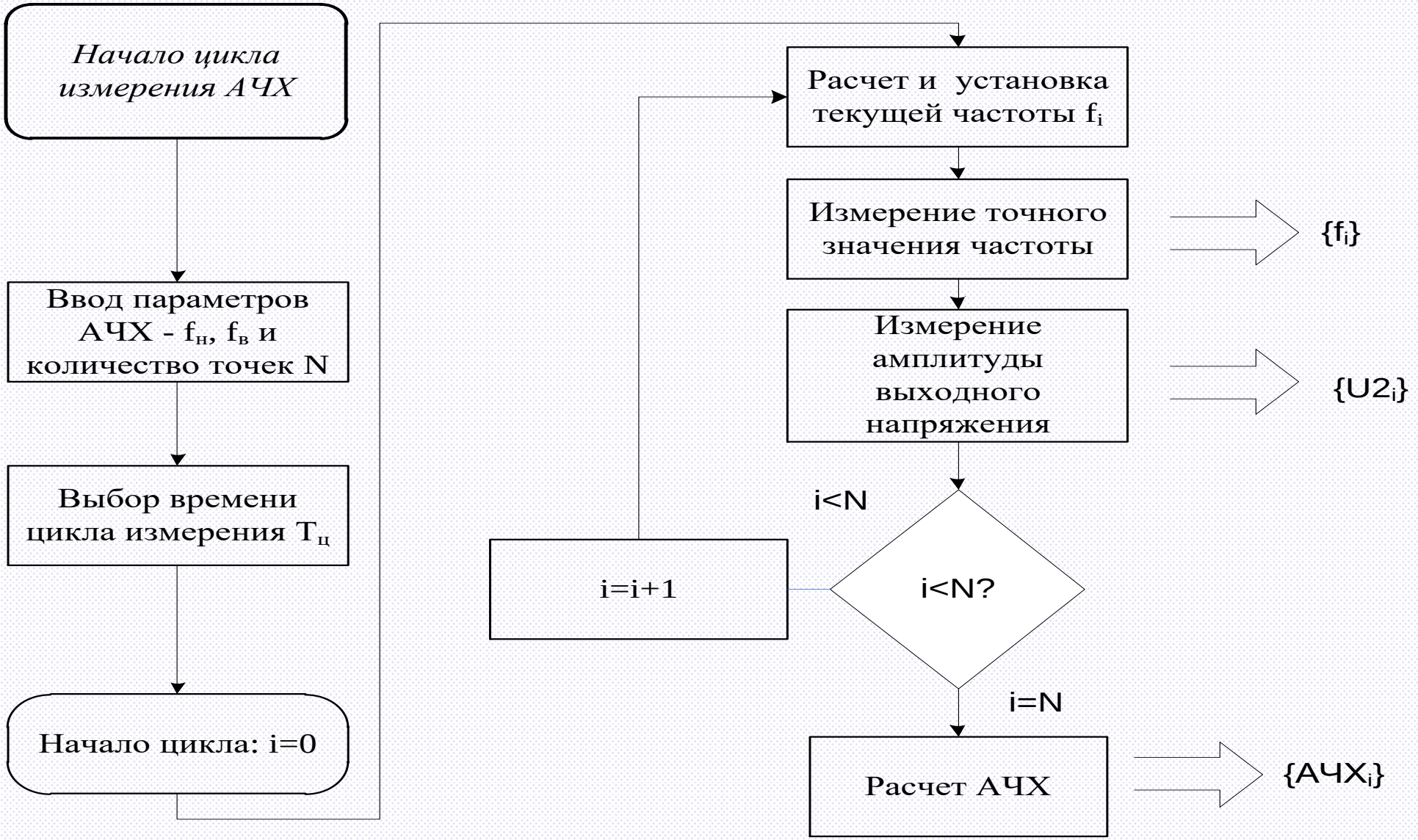
Основное отличие микропроцессорных приборов от панорамных измерителей АЧХ – применение ГКЧ **с цифровым управлением, цифрового** вольтметра и **ЖК дисплея** как индикатора



Закон изменения частоты генератора с цифровым управлением

Структурная схема микропроцессорного измерителя АЧХ





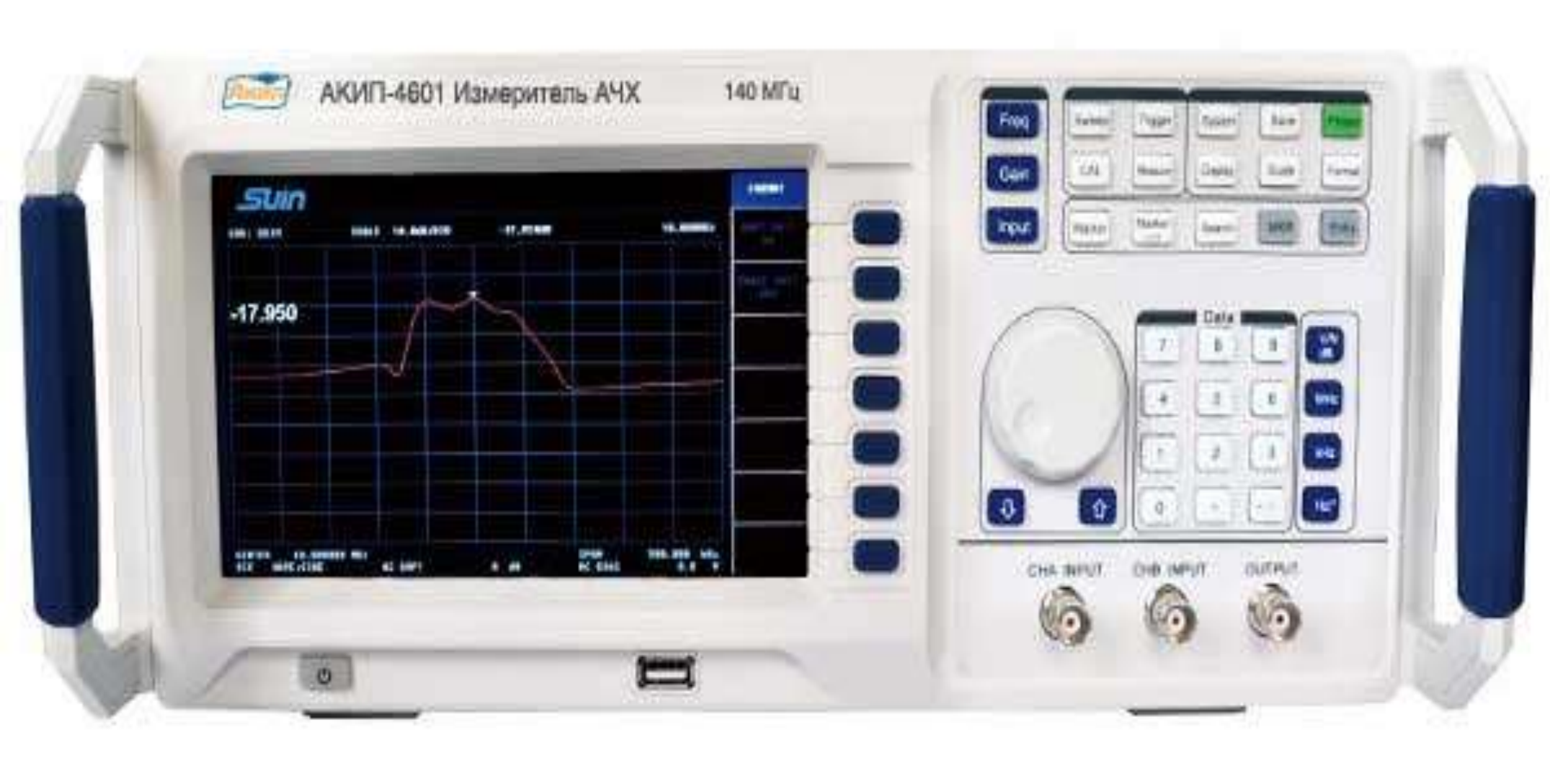
Алгоритм работы микропроцессорного измерителя АЧХ



Аналоговый ВЧ измеритель АЧХ Х1-43



Микропроцессорный НЧ измеритель АЧХ Х1-53



Микропроцессорный измеритель АЧХ АКИП-4601



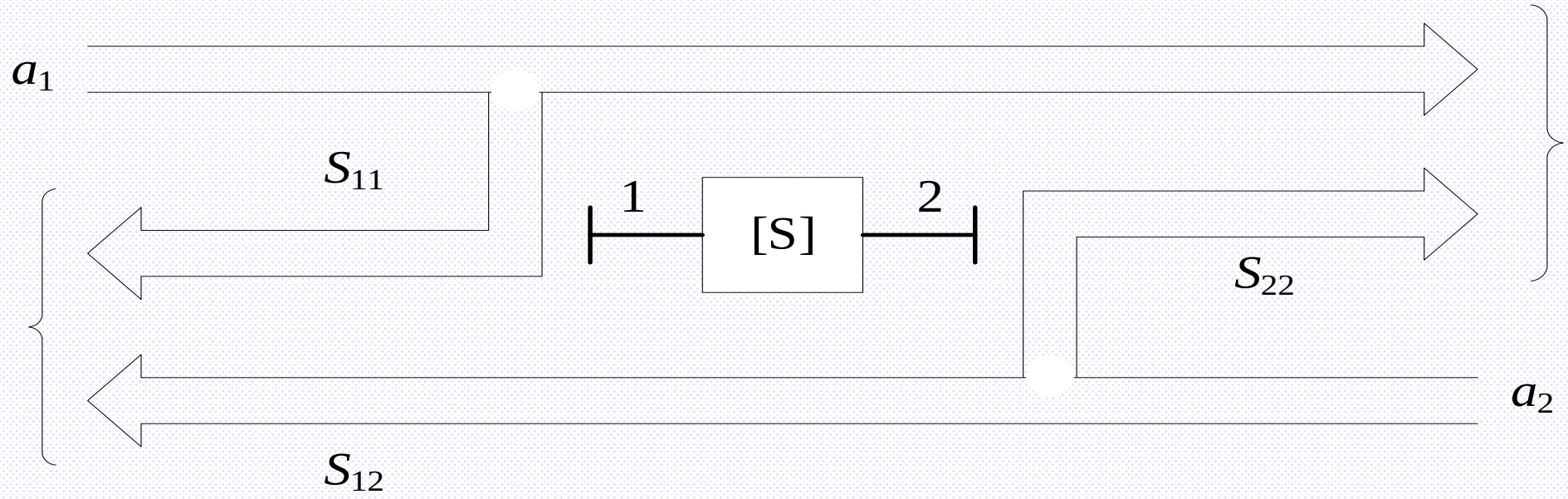
Экран микропроцессорного измерителя АЧХ

Измерение АЧХ на СВЧ – это определение модулей коэффициентов матрицы рассеяния [S] и рабочих параметров – КСВН и ослабления

Рабочий параметр АЧХ передачи ***ослабление*** $A, дБ = -20 \cdot \lg(|S_{21}|) = 10 \cdot \lg(\frac{P_1}{P_2})$

Рабочий параметр АЧХ отражения ***КСВН*** (**VSWR** — [Voltage Standing Wave Ratio] $КСВН = \frac{1}{КБВ} = \frac{1+|S_{11}|}{1-|S_{н11}|}$

Используют также АЧХ «***обратных потерь»*** $A_{обр}, дБ = -10 \cdot \lg(|S_{11}|^2) = -20 \cdot \lg(|S_{11}|)$



Физический смысл матрицы рассеяния 2-портового СВЧ узла

$$\begin{cases} b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \\ b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \end{cases}$$

Для измерения коэффициентов требуется согласование во **всех** плечах (включая генератор).

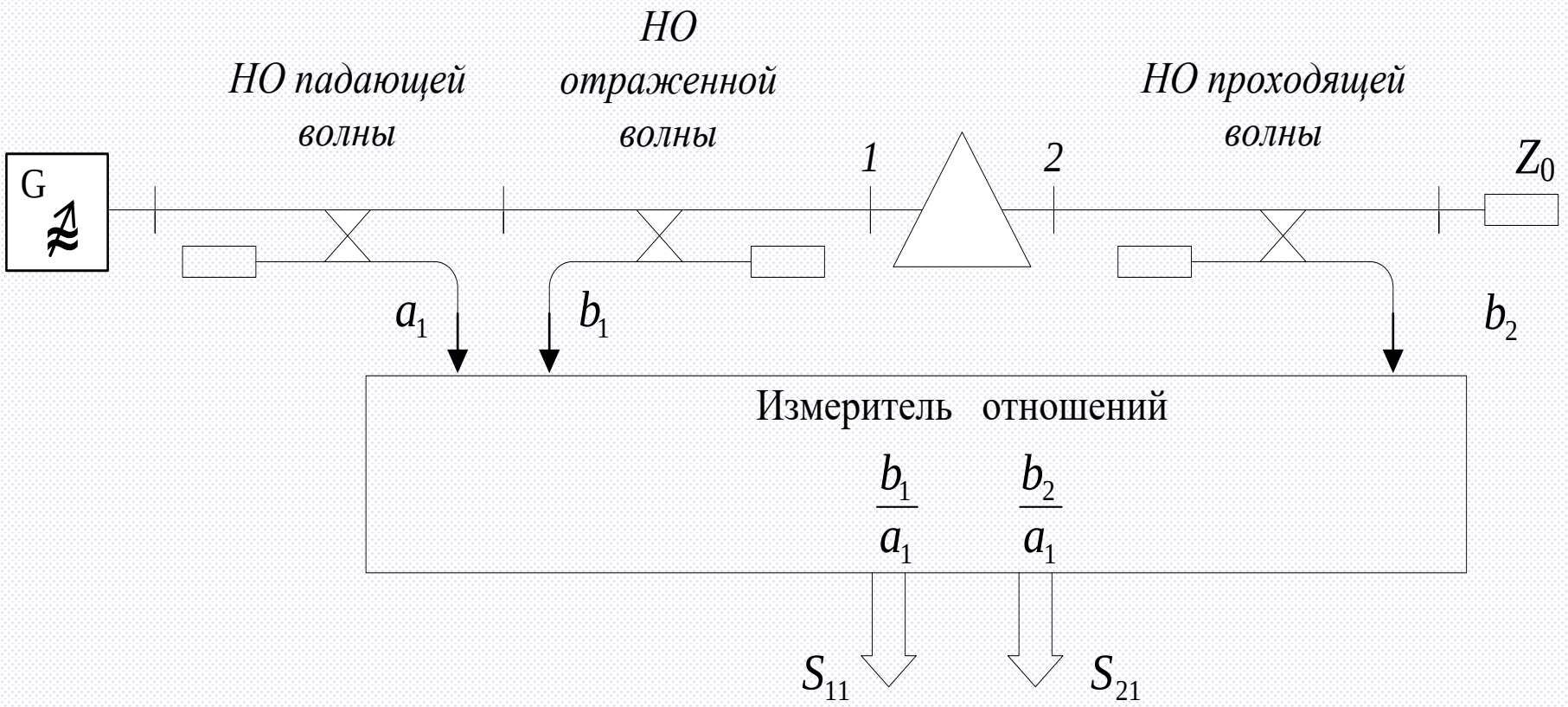
$$S_{11} = \left.\frac{b_1}{a_1}\right|_{a_2=0}$$

$$S_{21} = \left.\frac{b_2}{a_1}\right|_{a_2=0}$$

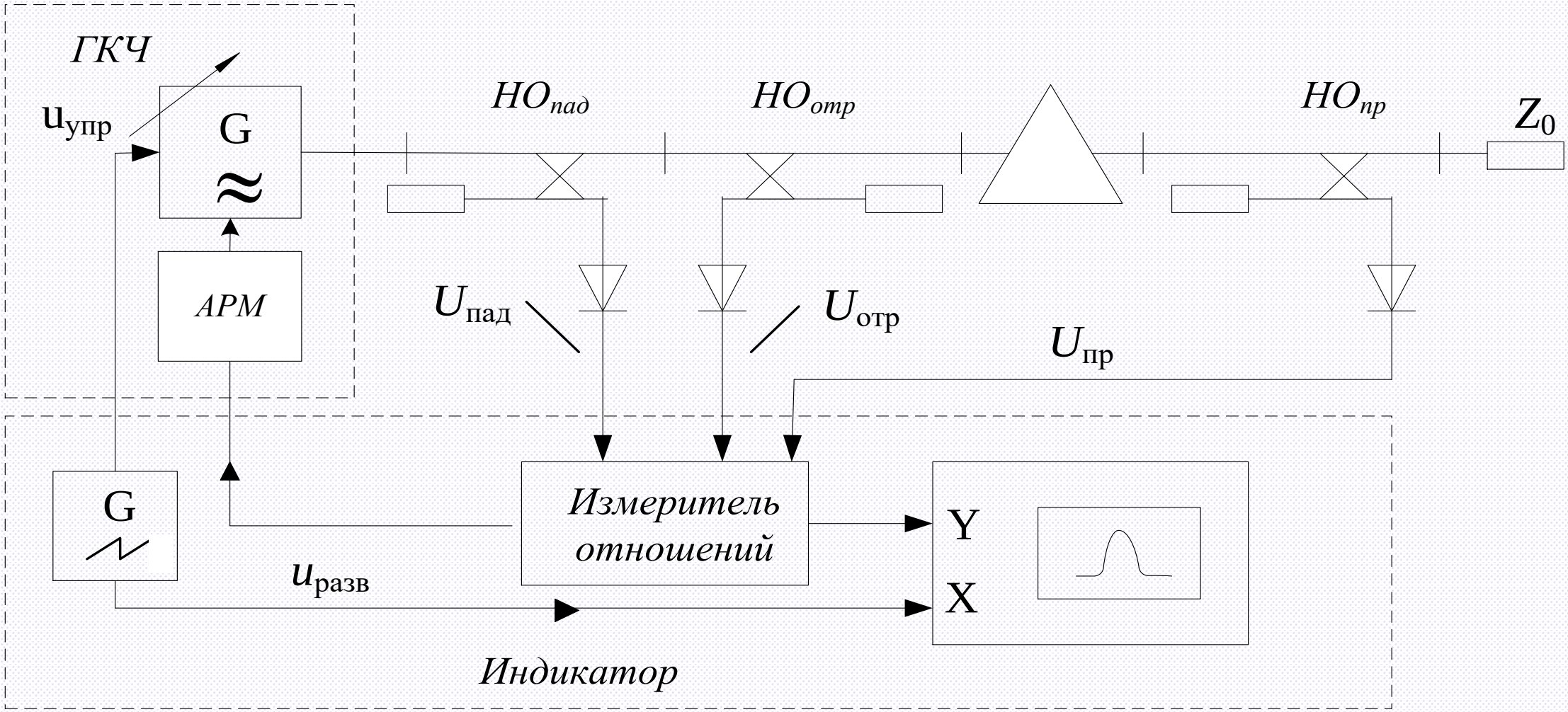
$$S_{22} = \left.\frac{b_2}{a_2}\right|_{a_1=0}$$

$$S_{12} = \left.\frac{b_1}{a_2}\right|_{a_1=0}$$

СВЧ тракт измерителя коэффициентов отражения/передачи R/T



Типовая схема скалярного измерителя КСВН и ослабления



Аналоговый измеритель КСВН и ослабления (типа Р2-61 и пр.)

Скалярный анализатор цепей Giga-tronics 8003





8003 Precision Scalar Network Analyzer - frequency range of 10 MHz to 40 GHz with a dynamic range of –70 to +20 dBm. Погрешность ±0.02 dB (±0.5%) over any 20 dB range from +16 to -70 dBm

Giga-tronics CW Power Sensor Selection Guide

	Frequency Range / Power Rangee	Maximum Power	Power Linearity [1] (Frequency > 8 GHz)	RF Connector
200 mW CW Power Sensors				
80301A	10 MHz to 18 GHz -70 to +20 dBm	+23 dBm (200 mW)	-70 to -20 dBm: ±0.00 dB -20 to +20 dBm: ±0.05 dB/10 dB	Type N(m) 50 Ω
80302A	10 MHz to 18 GHz -70 to +20 dBm	+23 dBm (200 mW)	-70 to -20 dBm: ±0.00 dB -20 to +20 dBm: ±0.05 dB/10 dB	APC-7 50 Ω
80303A	10 MHz to 26.5 GHz -70 to +20 dBm	+23 dBm (200 mW)	-70 to -20 dBm: ±0.00 dB -20 to +20 dBm: ±0.1 dB/10 dB	Type K(m) [2] 50 Ω
80304A	10 MHz to 40 GHz -70 to 0 dBm	+23 dBm (200 mW)	-70 to -20 dBm: ±0.00 dB -20 to 0 dBm: ±0.2 dB/10 dB	Type K(m) [2] 50 Ω

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!









МИНОБРНАУКИ РОССИИ

«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ” им. В. И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ)

Факультет радиотехники и телекоммуникаций,
Кафедра Теоретических основ радиотехники

http://kepstr.eltech.ru/tor/ptri

А.А. Данилин

«Приборы и техника радиоизмерений»
(электронный конспект лекций)

Компьютерные измерительные устройства

Санкт-Петербург
2024 г.

Недостатки микропроцессорной архитектуры измерительных приборов

- Невысокое быстродействие
- Ограниченный объем памяти
- Малая разрядность (наиболее дешевые 8-разрядные МПС имеют разрешающую способность 1/256 = 0.4%, что для современных измерений недостаточно).
- Ограниченный объем ПЗУ не позволяет хранить программы большого размера.
- Требуются специальные методы программирования (ассемблер).
- Нестандартные цифровые блоки приборов -> удорожание и сложности в ремонте

146

Компьютерные измерительные приборы и устройства (КИУ)

КИУ – набор измерительных преобразователей, соединенных с персональным компьютером + специализированное программное обеспечение КИУ.

Два принципа использования компьютеров в измерениях:

- Создание измерительно-вычислительного комплекса на основе измерительной системы со стандартным измерительным интерфейсом. В ряде случаев избыточно – требует реализации стандартного интерфейса.
- Использование персонального компьютера с измерительными преобразователями, включаемыми в системную шину компьютера или соединенными с ним простыми компьютерными интерфейсами. Такие приборы называют **компьютерными измерительными устройствами (КИУ)** (иногда компьютерными измерительными системами (КИС).

Преимущества КИУ по сравнению с МП измерительными приборами

- Универсальный компьютер – достаточно доступный и относительно дешевый инструмент, используемый не только для измерений.
- Не требуется обучения оператора
- Компьютер имеет высокое быстродействие, большую разрядность (32 или 64 бит) и значительный объем памяти с возможностью ее наращивания
- Большой объем стандартного программного обеспечения (операционные системы, программы управления компьютером, Матлаб, Маткад и пр.)
- Высокопроизводительные и надежные методы программирования на языках высокого уровня
- Большая емкость постоянной памяти (жесткие диски и др.)
- Легкость смены и обновления программного обеспечения,
- Простота включения КИУ в компьютерные сети и глобальную сеть Интернет.

Недостатки КИУ по сравнению с МП измерительными приборами

- Подключение измерительных блоков к компьютеру усложняет измерительную схему
- Меньшая надежность прибора
- Сложности подключения объекта измерения к входу КИУ
- Снижение быстродействия за счет необходимости обмена информацией с компьютером
- Сложность сертификации КИУ как измерительного прибора

Два варианта реализации КИУ

- **«от измерительного прибора»** – используется установка, включающая конструктивно самостоятельные измерительные блоки, связанные с компьютером простыми стандартными интерфейсами.
- **«от компьютера»** - используют универсальный компьютер и встраиваемые измерительные платы на системной шине. Возможны варианты с выносными блоками, связанными с компьютером по системной шине компьютера или по его портам LPT, COM,USB и пр.. Платы и блоки измерительных преобразователей КИУ называют ***DAQ (Data Aqusition) Board***. Наиболее известны платы DAQ фирмы National Instruments (г. Остин, Техас, США). (www.ni.com)

Обобщенная структурная схема КИУ



Измерительные сигналы вводят в ПК через устройство сбора данных DAQ Device. Он содержит АЦП разного вида.

Сигналы перед подачей на АЦП пропускают через согласующие измерительные преобразователи, осуществлявшие предварительное усиление, фильтрацию и пр. Конструктивно они могут быть включены в состав DAQ-устройства. Результат АЦП поступает в компьютер.

Программное обеспечение (ПО) КИУ реализует функции управления работой КИУ, взаимодействия с оператором, выполняет обработку и отображение информации на экране компьютера.

Узлы и блоки, входящие в состав типовых DAQ

- Аналоговые входы для подачи измерительных сигналов. Они могут быть изолированными от общего провода, дифференциальными, для определенного типа датчиков (например, термопар)
- Усилители аналоговых сигналов
- Фильтры помех и наводок
- Преобразователи формы сигналов, детекторы ВЧ сигналов
- Функциональные корректоры характеристик датчиков
- Мультиплексоры сигналов
- Аналоговые выходы для питания датчиков, для подачи эталонных сигналов на объект измерения.

- Аналого-цифровые преобразователи
- Цифро-аналоговые преобразователи для генерации тестовых сигналов
- Цифровые блоки ввода/вывода для сигналов управления и ввода цифровой измерительной информации
- Таймеры и счетчики – для измерения временных интервалов и синхронизации работы блоков
- Цифровые сигнальные процессоры (DSP – digital signal processor) – специализированные микропроцессоры для обработки преобразованных сигналов прямо на плате. Их использование позволяет повысить быстродействие КИУ за счет разгрузки основного процессора.

Примеры плат измерительных преобразователей КИУ

1. Универсальные многовходовые платы сбора данных. Применяются для устройств сбора информации.



плата NI PCI 6230

8 аналоговых входов,

16 разрядный АЦП со скоростью преобразования 250 Кслов /с,

4 аналоговых выхода (16 битный ЦАП),

6 цифровых входов,

4 цифровых выхода)



Примеры плат измерительных преобразователей КИУ





Варианты многофункциональных устройств с перенастраиваемым вводом-выводом; с интерфейсом USB и с интерфейсом PCIe

Платы таймер/счетчик. Содержит счетчик входных импульсов и образцовый генератор временных интервалов(таймер). Платы позволяют построить электронно-счетный частотомер и измеритель временных интервалов.



плата двухканального быстродействующего осциллографа NI PCI 5114.

Быстродействие 250 Кслов/с в реальном масштабе времени и до 5 Гслов/с в стробоскопическом режиме для повторяющихся сигналов. Встроенная память 256 Мб, обеспечивает анализ сигналов от 40 мВ до 40 В.

Платы быстродействующих АЦП

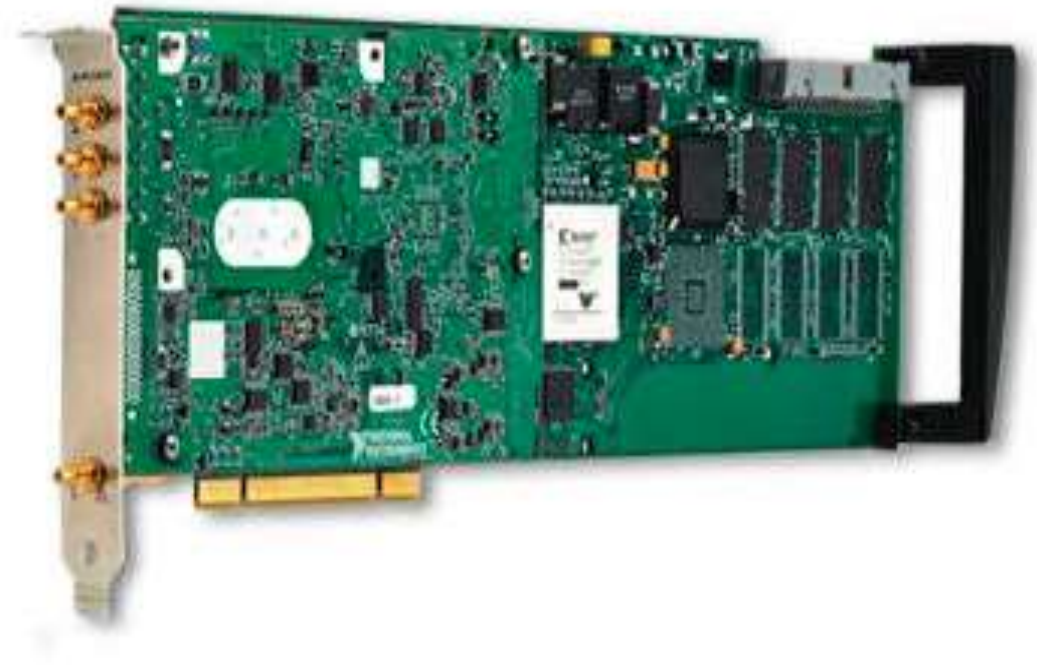


Двухканальные NI USB 5152 и 5133– 8-битные осциллографы с частотой дискретизации 60 Мслов/с и 100 Мслов/с.

PCI -платы осциллографа NI 5122 (14 бит, 100 Мслов/с) и 8ми канального оцифровщика (дигитайзера) NI 5105 12 бит, быстродействие 60 Мслов/с

Виды плат измерительных преобразователей

Платы функциональных генераторов сигналов. Содержат ЦАП и позволяют программно задавать любую форму выходного аналогового сигнала.





Плата генератора NI PCI 5412

содержит 14-битный ЦАП, работающий с тактовой частотой до 100 Мслов/с, что позволяет обеспечить диапазон частот сигнала до 20

Виды плат измерительных преобразователей



СВЧ векторные генераторы в формате PXI

Платы многофункциональных измерителей параметров сигналов. Это универсальные мультиметры (DMM - Digital MultiMeter). Содержат, кроме АЦП, набор функциональных преобразователей, расширяющих список измеряемых физических величин (напряжение, ток, сопротивление и др.).



Измеряет постоянное и переменное напряжение и ток, сопротивление.. 6 ½ десятичных разряда, быстродействие до 3000 измерений в секунду.



Векторный анализатор СВЧ цепей

Модульная система согласования и коммутации измерительных сигналов SCXI (Signal Conditioning Extensions for Instrumentation).



Шасси SCXI является, высокоскоростным коммутатором сигналов. Интерфейс SCXIbus содержит аналоговые и цифровые линии передачи со скоростью от 333Кслов/с до 1,2 Мслов/с







Модульная измерительная система на открытом стандарте шины PXI (PCI eXtention for Instrumentation).

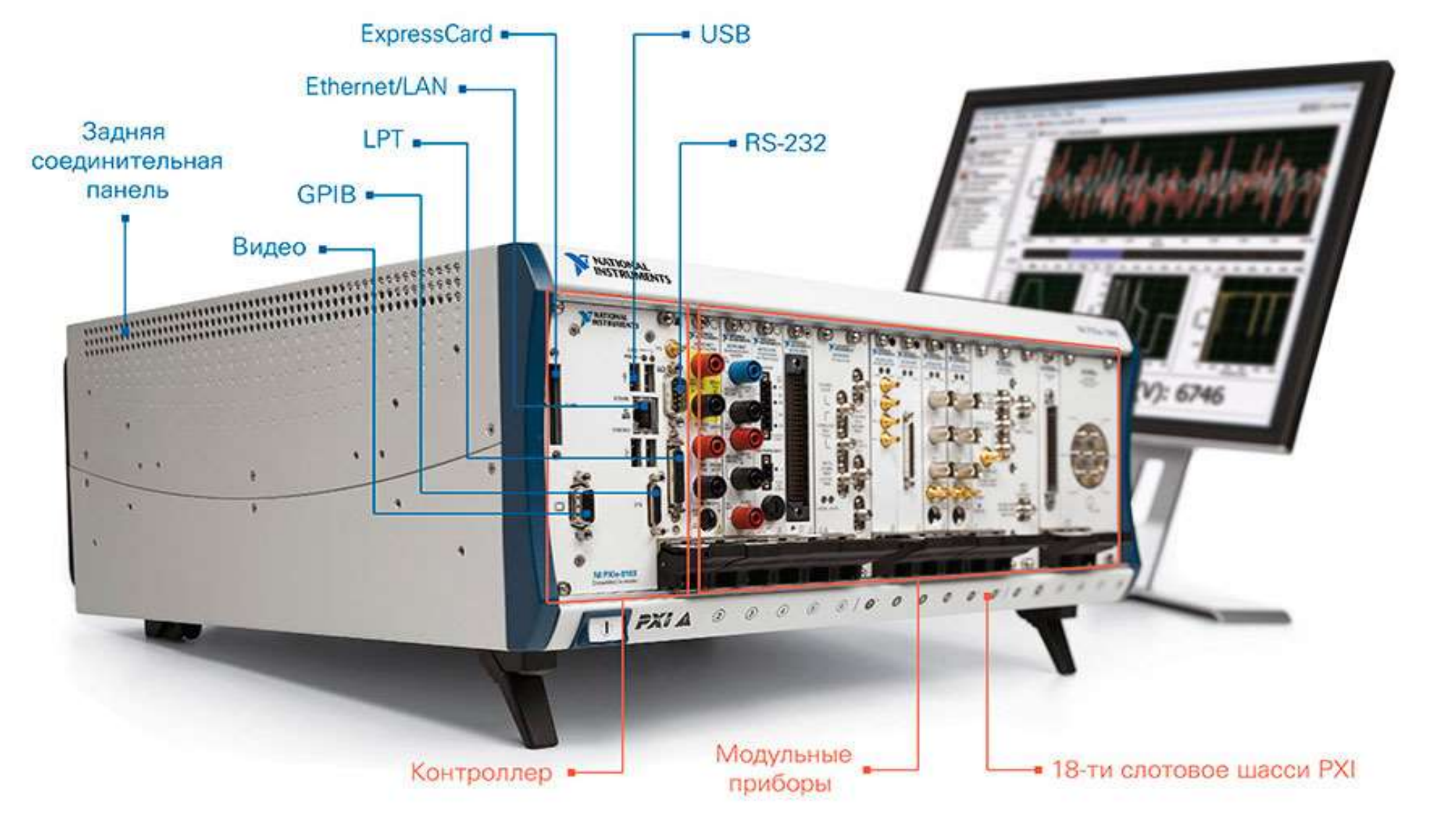
PXI система представляет собой шасси на базе встроенной высокоскоростной шины CompactPCI. Пропускная способность шины PCI составляет 132 Мбайт/с (32 разряда, 33 МГц).

Стандарт PXI использует PC-совместимое оборудование и платформу Windows. Система PXI включает в себя корзину-шасси, в слоты которого вставлены PXI-совместимые платы-модули измерительных преобразователей КИУ. Одно PXI шасси может содержать до 18 измерительных модулей. Левый PCI-слот в корзине PXI предназначен исключительно для размещения компьютерного модуля системного контроллера ..

Модульная измерительная система NI PXIe-1085 на открытом стандарте шины PXI (PCI eXtention for Instrumentation).



Стандарт PXI был введён в 1997 году как открытый стандарт альянсом PXISA (PXI Systems Alliance


ExpressCard
USB
Ethernet/LAN
Задняя соединительная панель
LPT
RS-232
GPIB
Видео
Контроллер
Модульные приборы
18-ти слотовое шасси PXI

Модуль контроллера шасси на стандарте шины PXI



Программное обеспечение КИУ. Виртуальные приборы

Программное обеспечение КИУ определяет функцию прибора, его назначение и основные характеристики, степень автоматизации и пр. ***Базовое*** – драйверы плат, библиотеки драйверов. Часто поставляются в виде расширения широко распространенных языков программирования. Это обеспечение поставляется вместе с измерительными платами и блоками.

Универсальное – комплексы программ, рассчитанные на реализацию измерительных задач разного типа и ориентированные на работу с различными платами. Сюда относят прикладные проблемно-ориентированные пакеты программ и инструментальные пакеты для сбора, обработки и визуального представления информации.

Программы виртуальных приборов (ВП) (VI –Virtual Instruments).

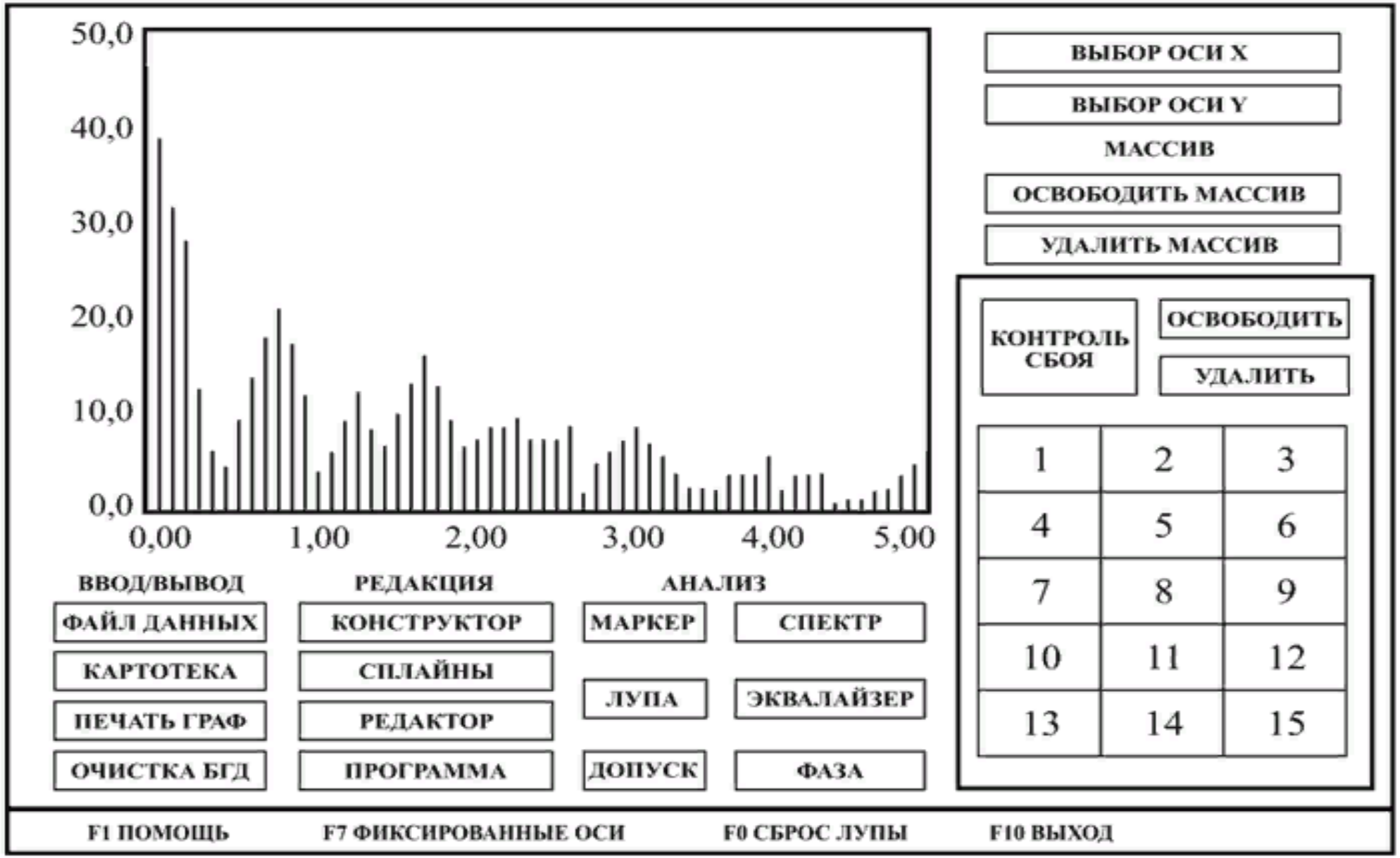
Под ***виртуальным («кажущимся»)*** прибором понимают средство измерений для сбора, обработки и визуального представления измерительной информации, построенное на базе персональных компьютеров (ПК) и встраиваемых в компьютер многофункциональных измерительных плат, программно-управляемых внешних модулей предварительной обработки сигналов и автономных измерительных приборов, связанных с компьютером различными интерфейсами (RS-232C, IEEE488 (GPIB), VXI и др.).

.

Эти средства называются ***виртуальными*** по нескольким причинам:

- Управление такими системами осуществляется через графический пользовательский интерфейс (Graphics User Interface - GUI) с использованием «виртуальных» элементов управления, расположенных на виртуальных приборных панелях, выводимых на дисплей компьютера
- Управление виртуальным прибором состоит в имитации нажатия кнопок на экране, поворота ручек и пр. Достоинство виртуальных приборов заключается в простоте управления, лучшем понимании логики работы измерительного устройства, особенно операторами, не владеющими компьютерными технологиями в совершенстве.
- . С помощью одного и того же аппаратного и программного обеспечения можно сконструировать несколько «виртуальных» КИУ, выполняющих совершенно различные функции и имеющую собственный пользовательский интерфейс.

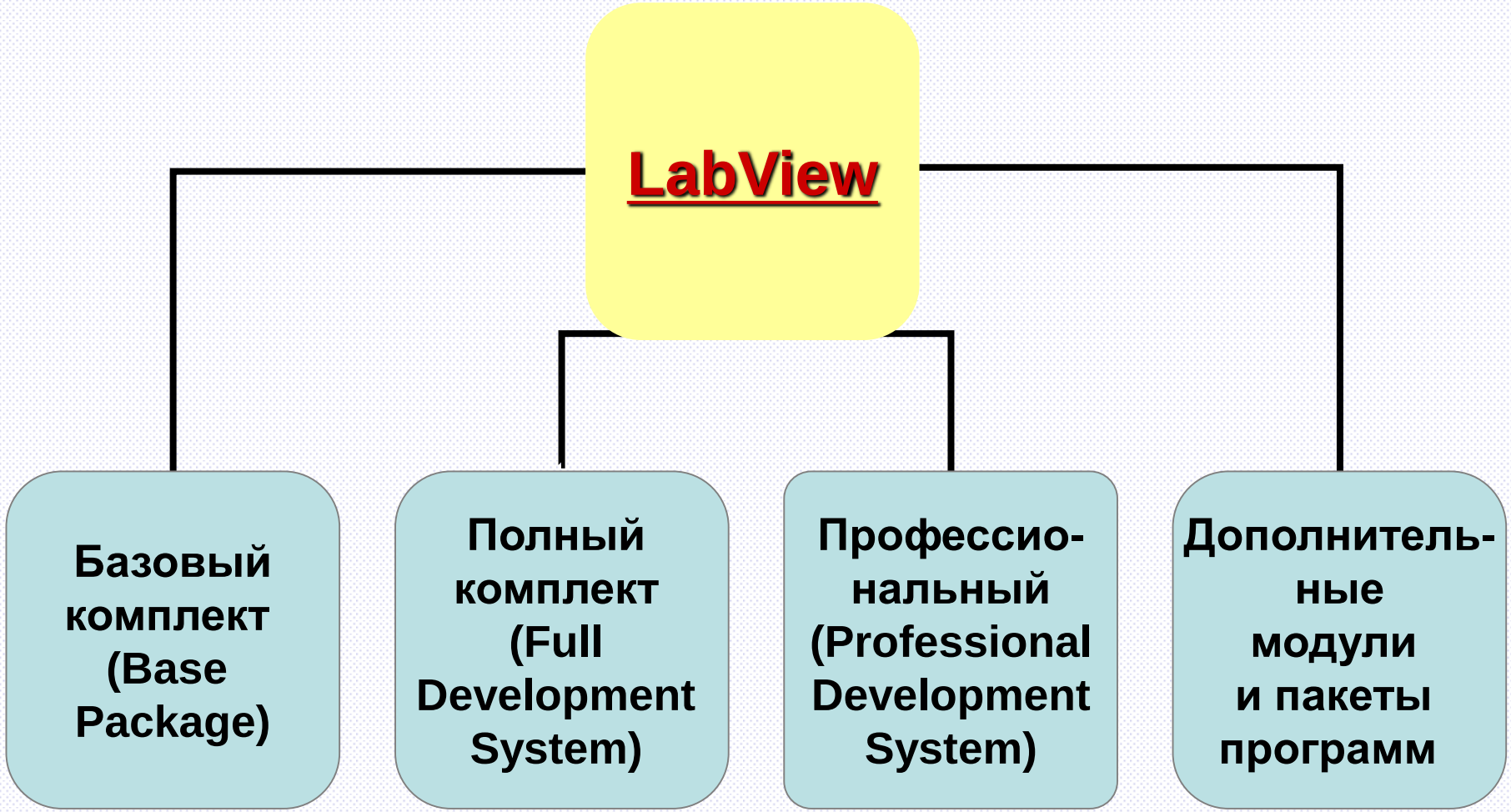
Пример приборной панели виртуального анализатора спектра



Программное обеспечение виртуальных КИУ

Наиболее известная программная среда конструирования виртуальных приборов - это система Laboratry Virtual Instrument Engineering Workbench - ***LabView*** фирмы NI (National Instument), позволяющая легко создать образ реального измерительного прибора на базе персонального компьютера. Основа системы - графический язык программирования "G". При инсталляции специального драйвера National Instument DAQ, LabVIEW получает возможность общаться со всеми LPT и COM портами ПК, а также с подключенными к нему через различные интефейсы Устройствами в составе измерительной системы. Современный уровень - система программно-определяемых приборов (SDI – Software Designed Instruments). На программном уровне меняются параметры и назначение прибора. Программа, реализующая виртуальный прибор, состоит из передней панели, куда помещаются графические элементы ввода/вывода информации и управления, и блок-диаграммы алгоритма работы прибора.

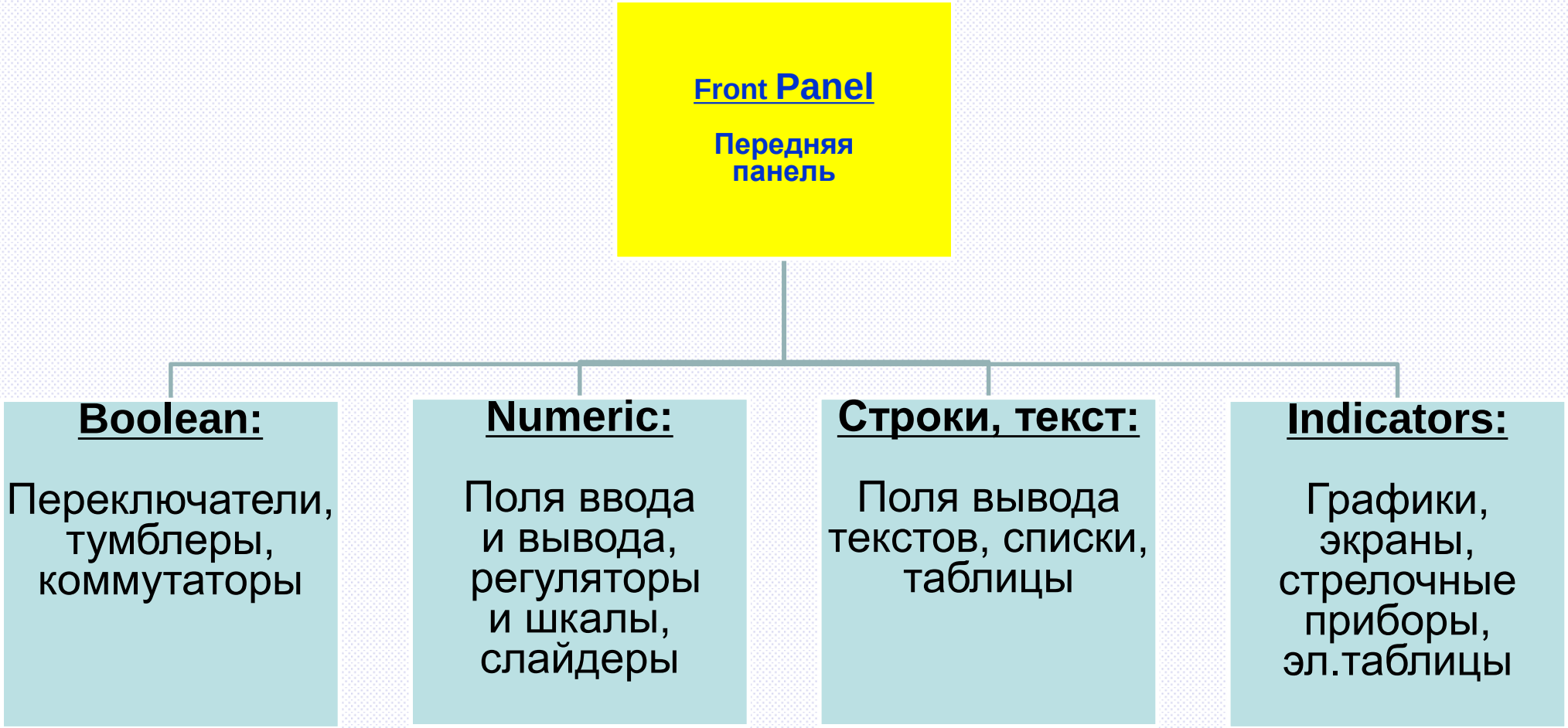
- программная среда для разработки виртуальных приборов, анализа и моделирования сигналов и систем

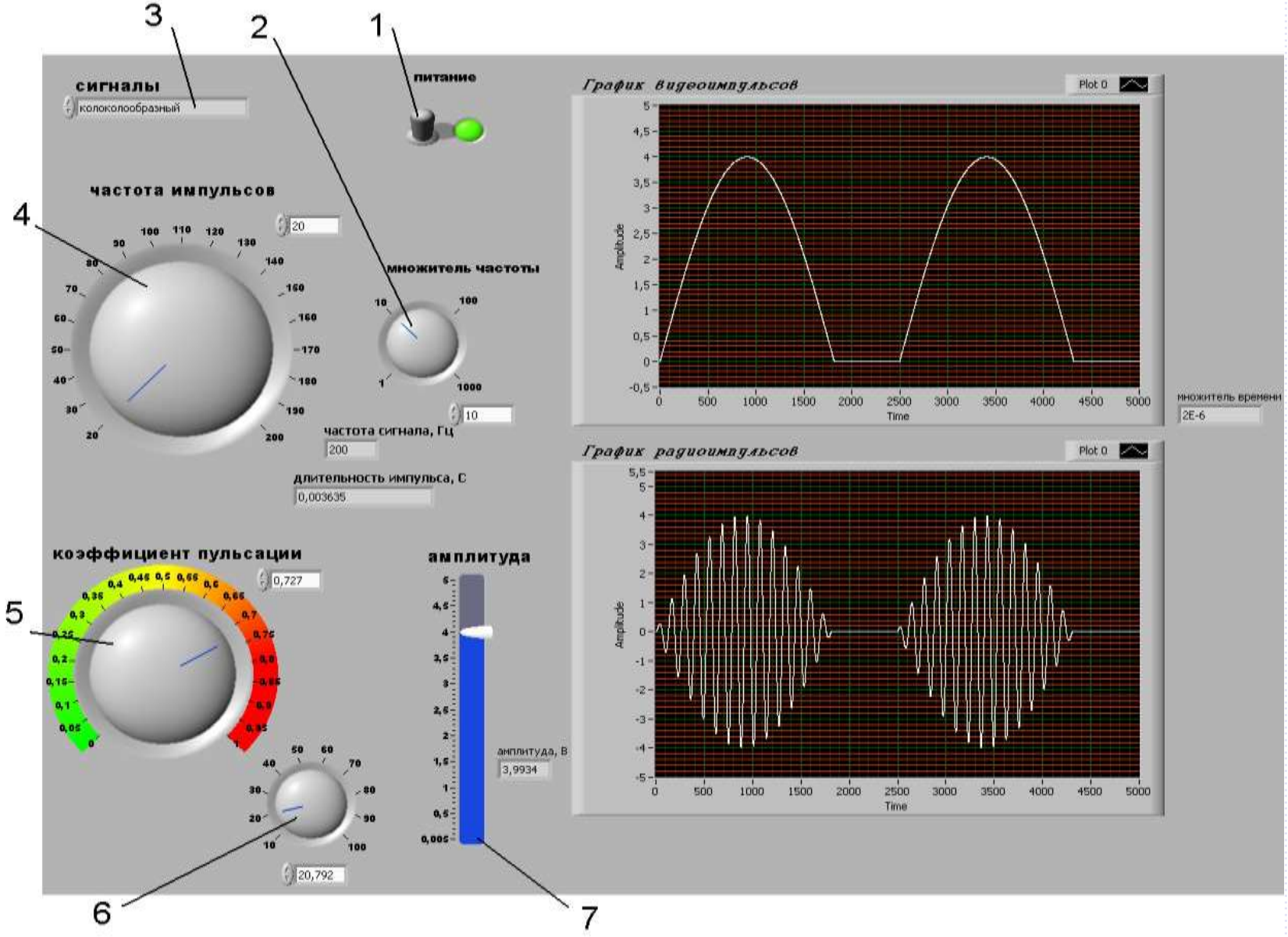


В процессе программирования ВП выделяют следующие этапы:

- Подключение драйвера соответствующего DAQ-устройства, который должен поставляеться его производителем.
- Разработка передней панели виртуального прибора, выбор и размещение элементов управления (ручки, переключатели, кнопки, и пр.), полей ввода/вывода численной или текстовой информации и индикаторов (лампочки, цифровые табло, дисплеи и пр.).
- Программирование логики работы прибора на его блок-диаграмме. На ней указывается алгоритм функционирования, потоки сигналов и их преобразование. Блок-диаграмма строится из элементов и соединителей. Соединители имитируют линии связи, проводники или шины. Элементами блок-диаграммы являются органы управления передней панели, константы, функции, объекты со сложной структурой (фильтры, преобразователи формы и пр.). Их можно помещать в циклы, ветви логического “if” , задавать время и последовательность выполнения.

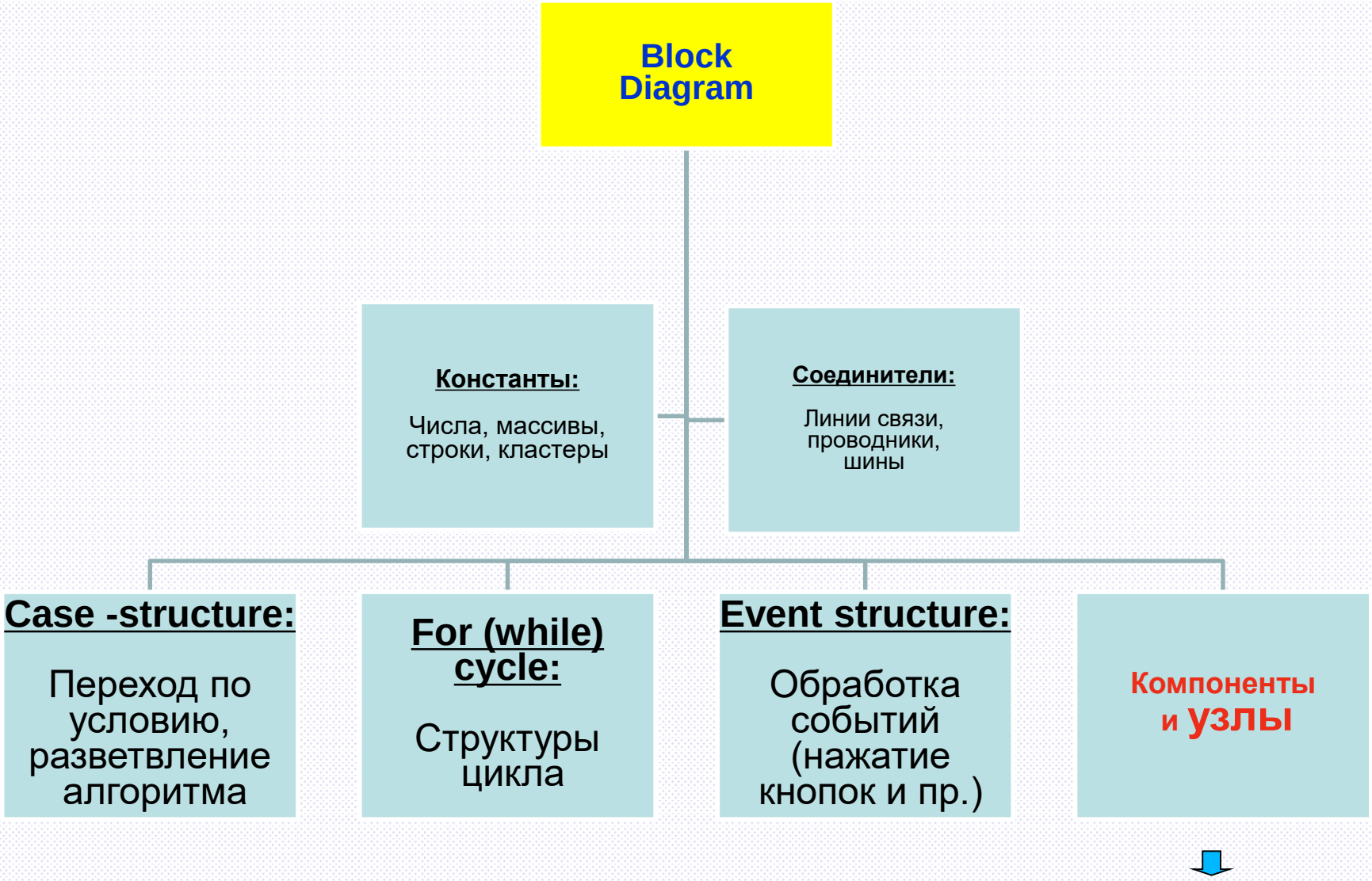
Виртуальный прибор (vi) - 0



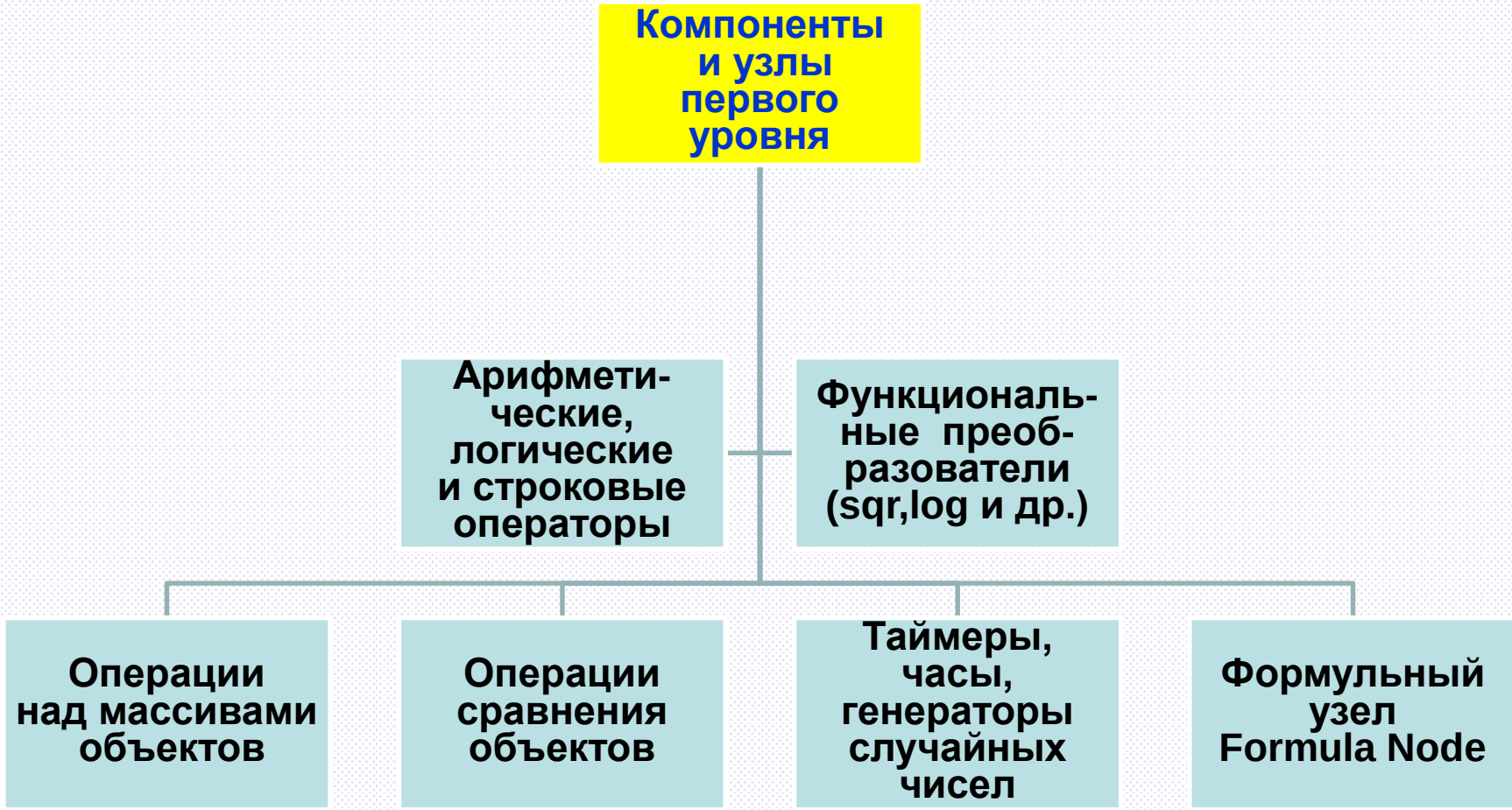


Передняя панель виртуального генератора импульсов

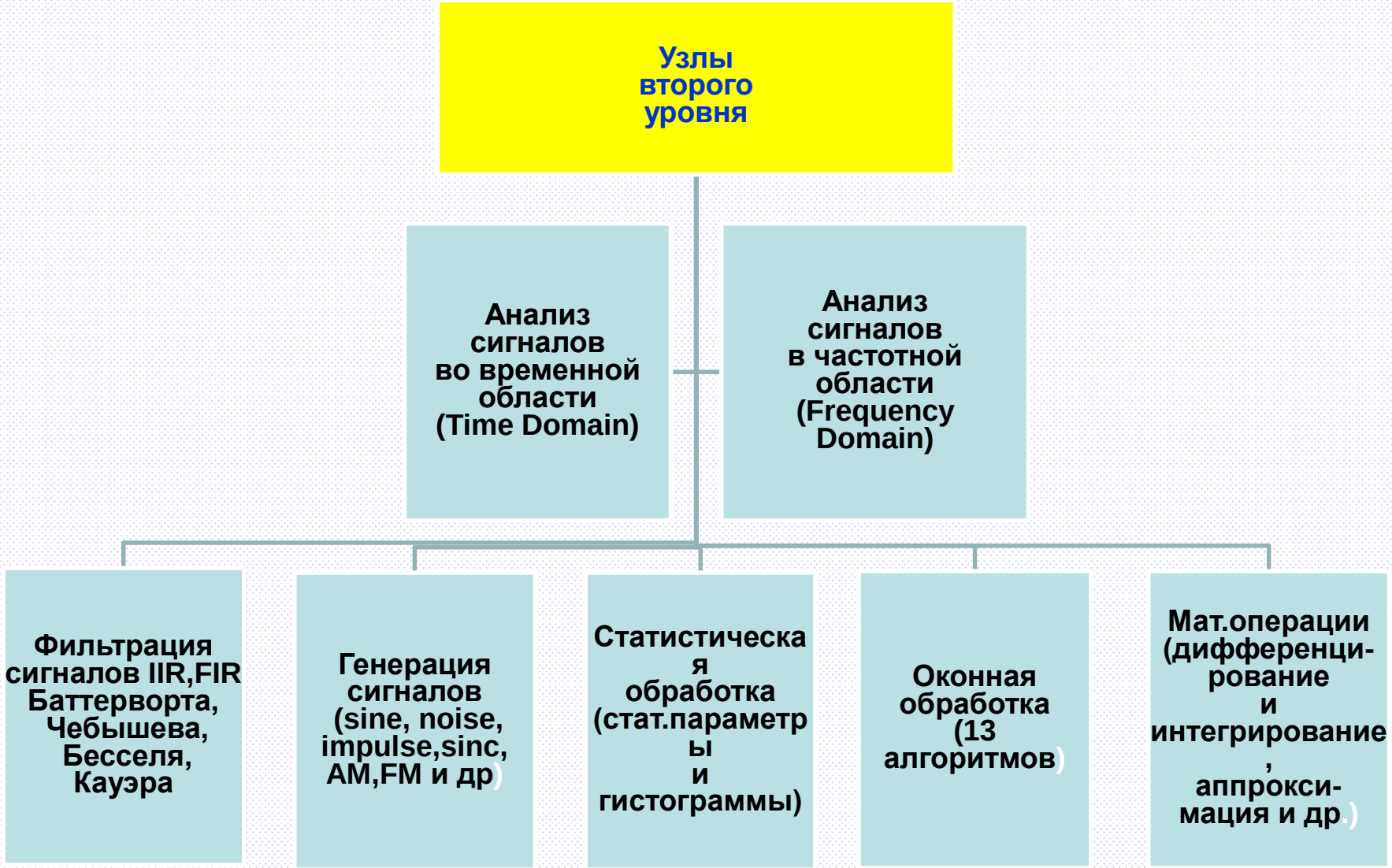
Виртуальный прибор (*vi*) - I

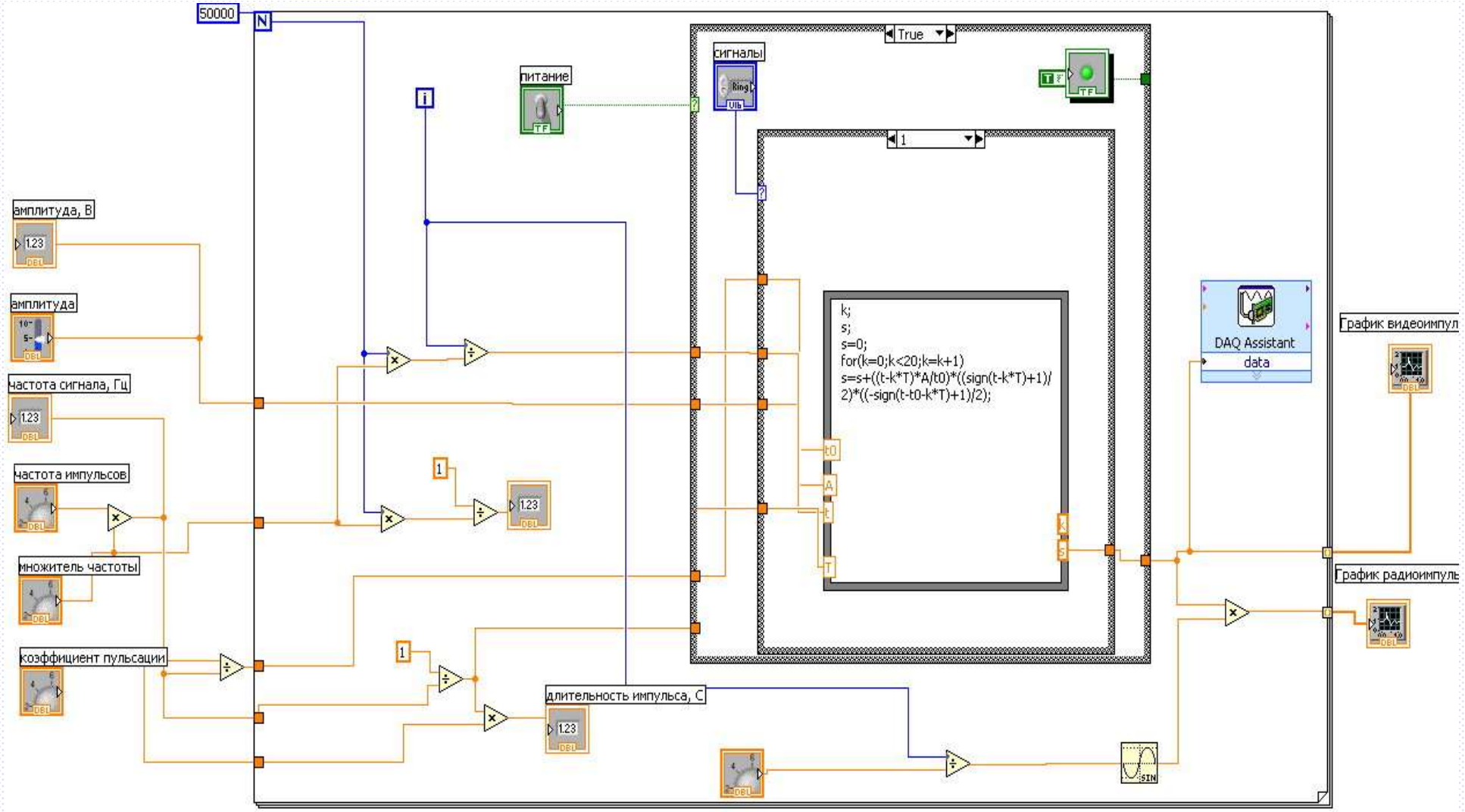


Виртуальный прибор (*vi*) - II



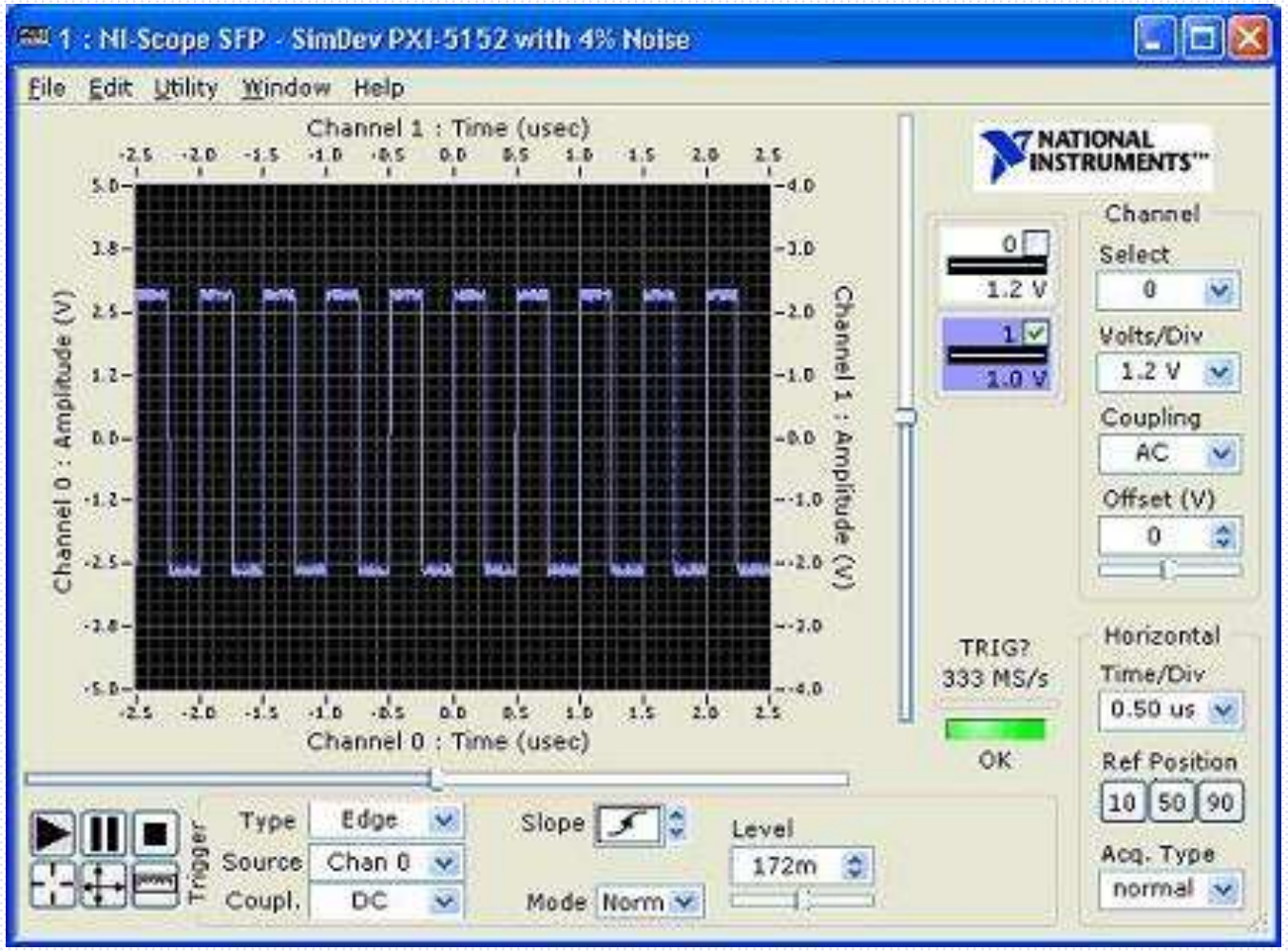
Виртуальный прибор (*vi*) - III





Блок-схема виртуального генератора импульсов

Цифровой виртуальный осциллограф на основе платы сбора данных USB6221



Задачи, решаемые виртуальным осциллографом:

- исследование параметров радиосигналов сложной формы с АМ и ЧМ модуляцией;
- программирование в системе LabView.
- изучение компьютерных измерительных устройств;

Пример лабораторной работы с LabView

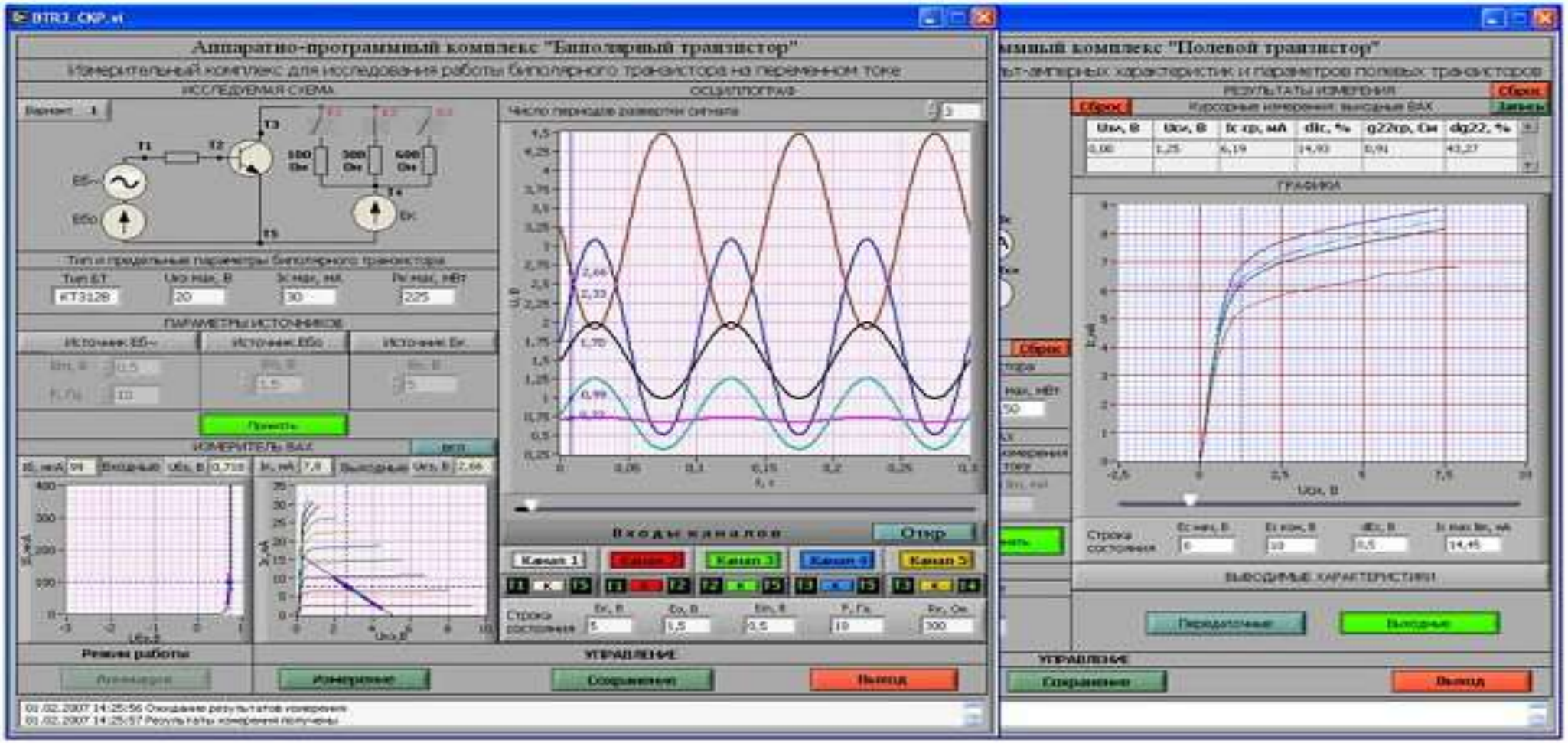


Рис. 2. Фрагменты лицевых панелей виртуальных лабораторных стендов для исследования биполярного и полевого транзисторов

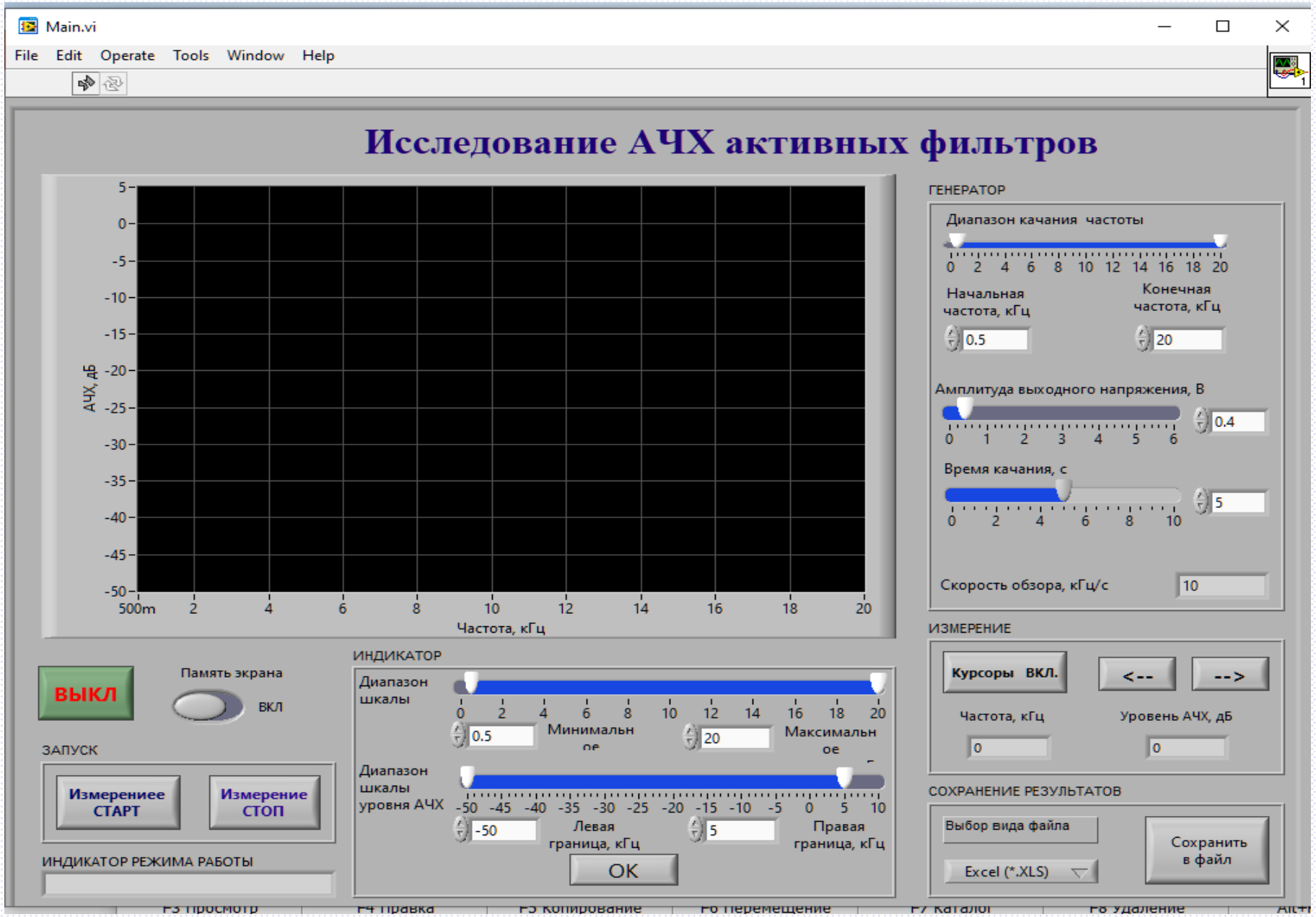
Плата ввода-вывода DAQ NI 6221 USB



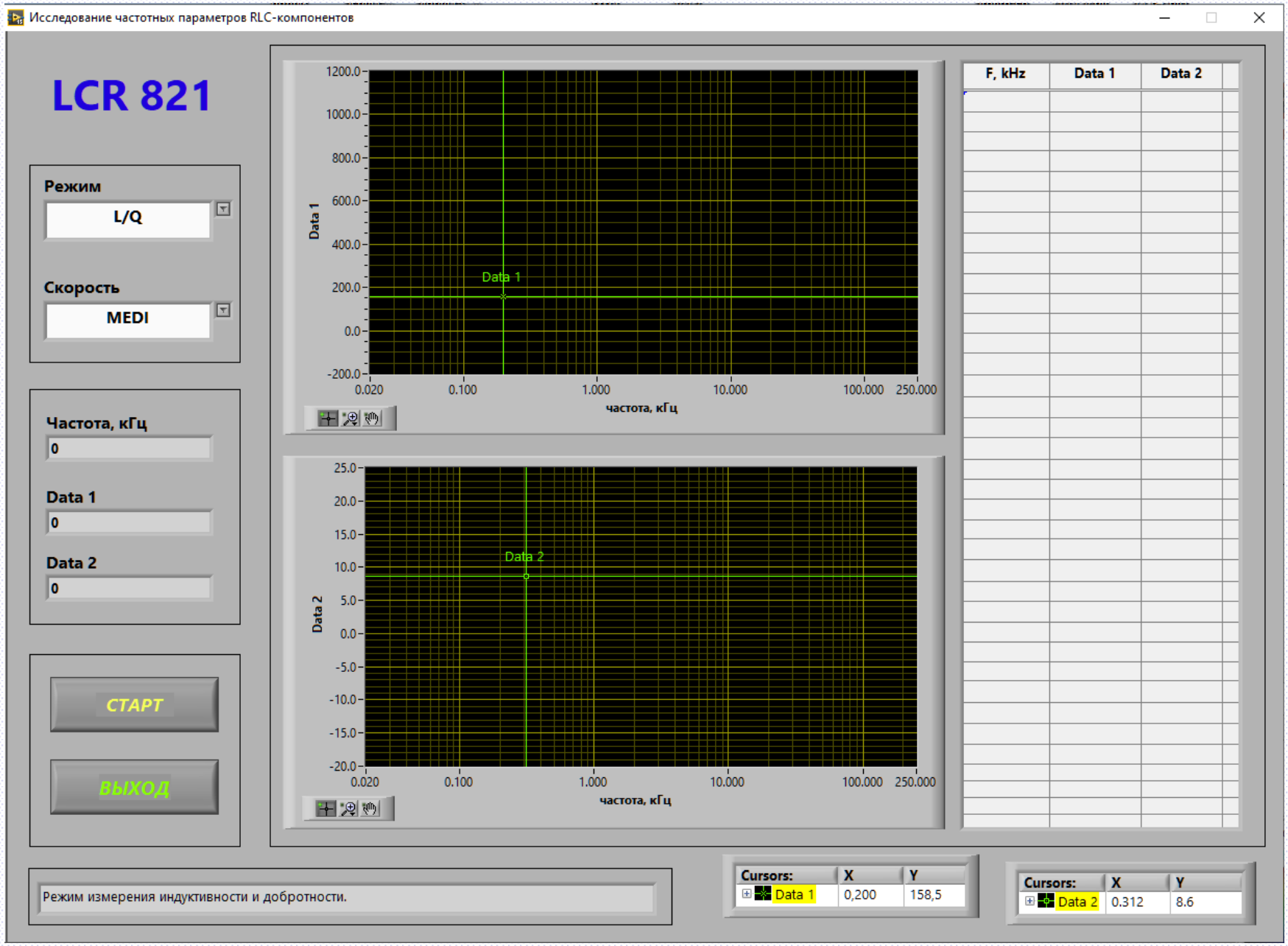
Основные параметры платы

- интерфейс - USB 2.0
- 16 аналоговых входов; -10…+10В, 16 бит;
- скорость АЦП – 250 кслов/с;
- 2 аналоговых выхода (-10..+10 В,16 бит, 833 кслов/с);
- 24 цифровых входа/выхода;
- 2 счетчика с разрешением 32 бит.

Виртуальный прибор – измеритель АЧХ на основе DAQ NI 6221 USB



Виртуальный измеритель параметров RLC на основе прибора «LCR 821»

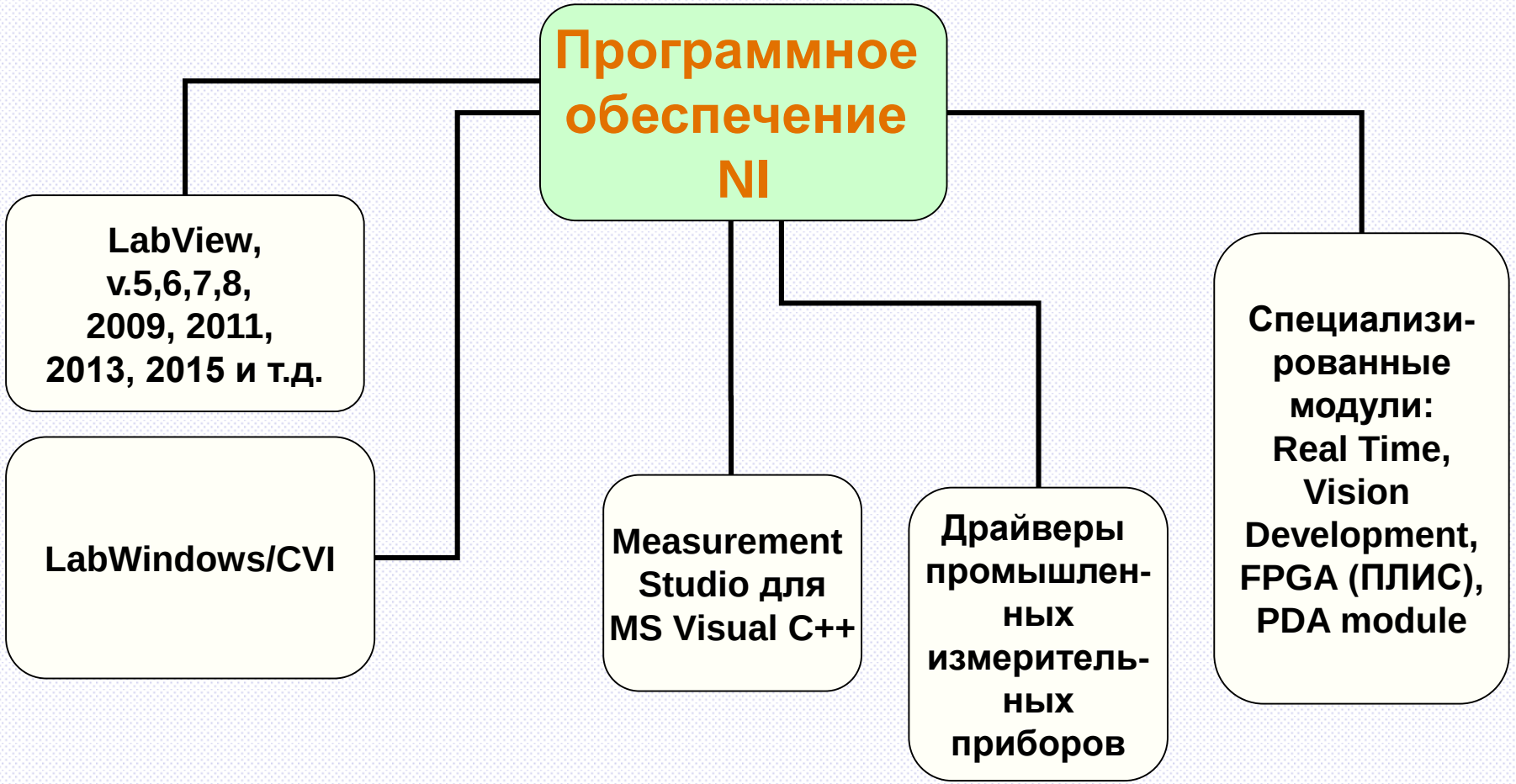


Другие типы программного обеспечение виртуальных КИУ

Среда LabView - это интерпретатор. Для создания самостоятельных программных приложений используют ***LabWindows/Cvi*** – полнофункциональную среду разработки виртуальных приборов на базе языка С. Среда сочетает интерактивный, простой в использовании подход и гибкостью и мощью программирования компилированного С кода.

Другой подход реализован в пакете ***Measurement Studio.*** Это интегрированный набор инструментов и библиотек классов для программной среды Visual Studio компании Микрософт, ориентированный на языки Visual C++, Visual Basic, Visual C#.

Программное обеспечение VI National Instruments (NI)



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!









МИНОБРНАУКИ РОССИИ

«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ” им. В. И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ)

Факультет радиотехники и телекоммуникаций,
Кафедра Теоретических основ радиотехники

http://kepstr.eltech.ru/tor/ptri

А.А. Данилин

«Приборы и техника радиоизмерений»
(электронный конспект лекций)

Измерительные системы

Санкт-Петербург
2024 г.

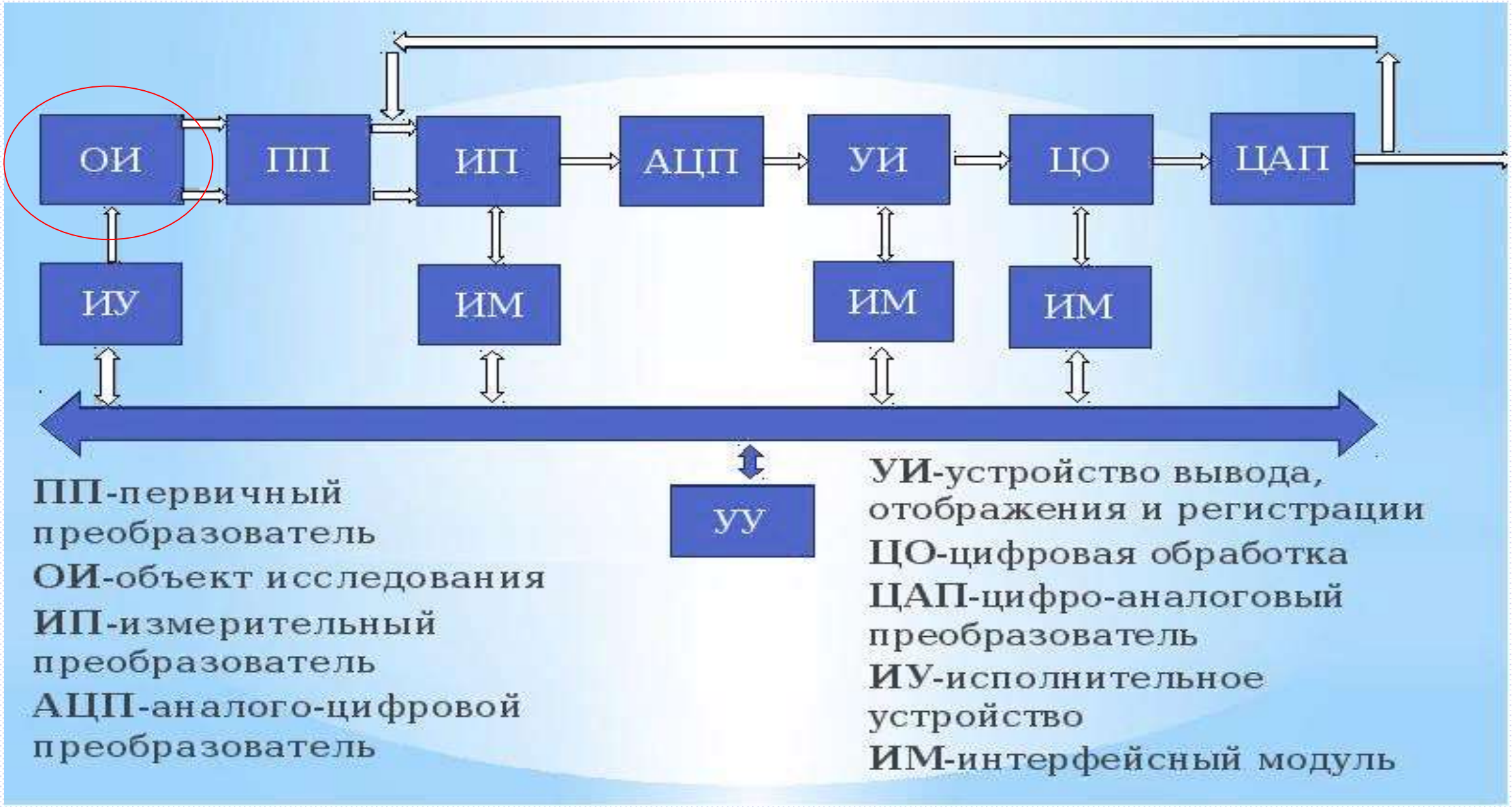
Измерительные системы

Измерительная система (ИС) – это функционально объединенная совокупность:

- средств измерений;
- средств обработки информации;
- средств хранения (запоминания) и регистрации информации;
- средств отображения результатов измерений;
- средств управления измерительным процессом

Агрегатный (модульный) принцип разработки: ИС собирается из узлов (*модулей*), объединенных общим принципом построения и взаимодействия (*интерфейсом*).

Структура типовой измерительной системы



Агрегатные ИС - должны обеспечивать необходимые уровни совместимости средств ИС (возможность объединять модули без их доработки и конструктивных изменений).

1. Функциональная совместимость: модули функционально закончены и автономны; набор модулей должен решать все поставленные перед ИС измерительные задачи;

2. *Информационная* совместимость: единые формы и виды сигналов по входам и выходам (соединительные разъемы).

3. Программная совместимость: единство алгоритмов обмена информацией

.4. *Конструктивная* совместимость – согласование конструктивных параметров, одинаковые габаритные и присоединительные размеры (платы, стойки, шкафы), единые типы разъемов.

5. *Энергетическая* совместимость – единые требования к виду питающих напряжений, токов, частот.

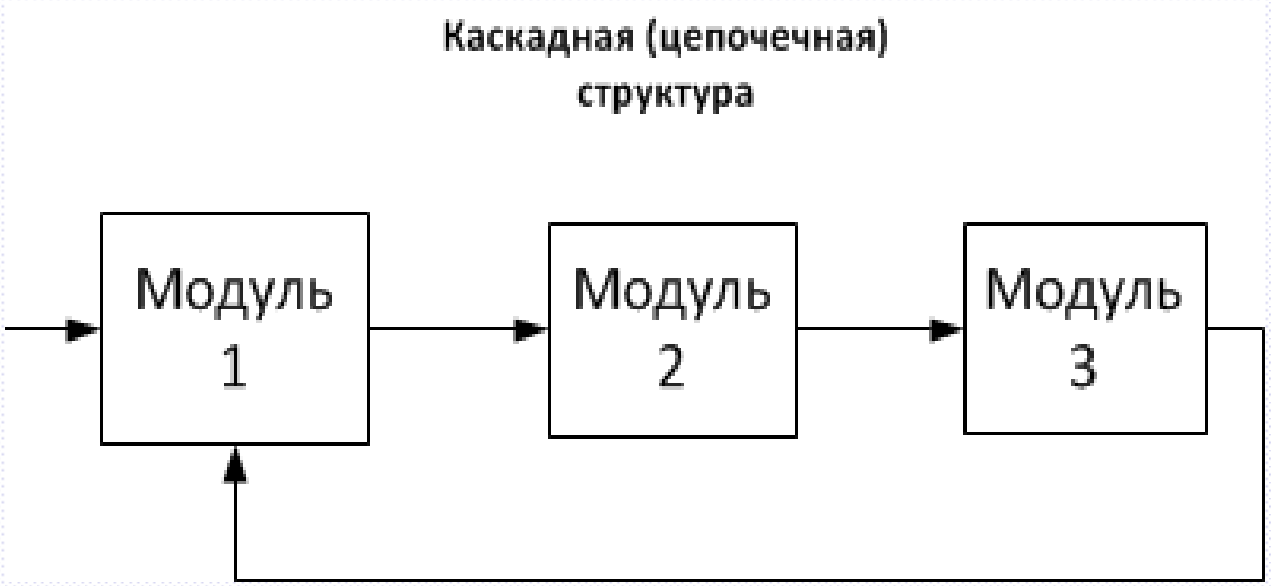
6. *Эксплуатационная* совместимость – согласование модулей по надежности, уровню помех и пр.

7. *Метрологическая* совместимость – применение единых методов расчета погрешностей, сопоставимость результатов измерений.

Принципы агрегатирования измерительных систем

Приборно-модульный	***Функционально – модульный***
Каждый модуль ИС – функционально автономный законченный измерительный блок (прибор), который может работать вне ИС. Модули соединяются между собой *приборным* интерфейсом.	Модули ИС – функционально законченные блоки, которые не обладают автономностью (платы, отдельные измерительные преобразователи и датчики), Могут работать только в составе ИС под управлением контроллера ИС



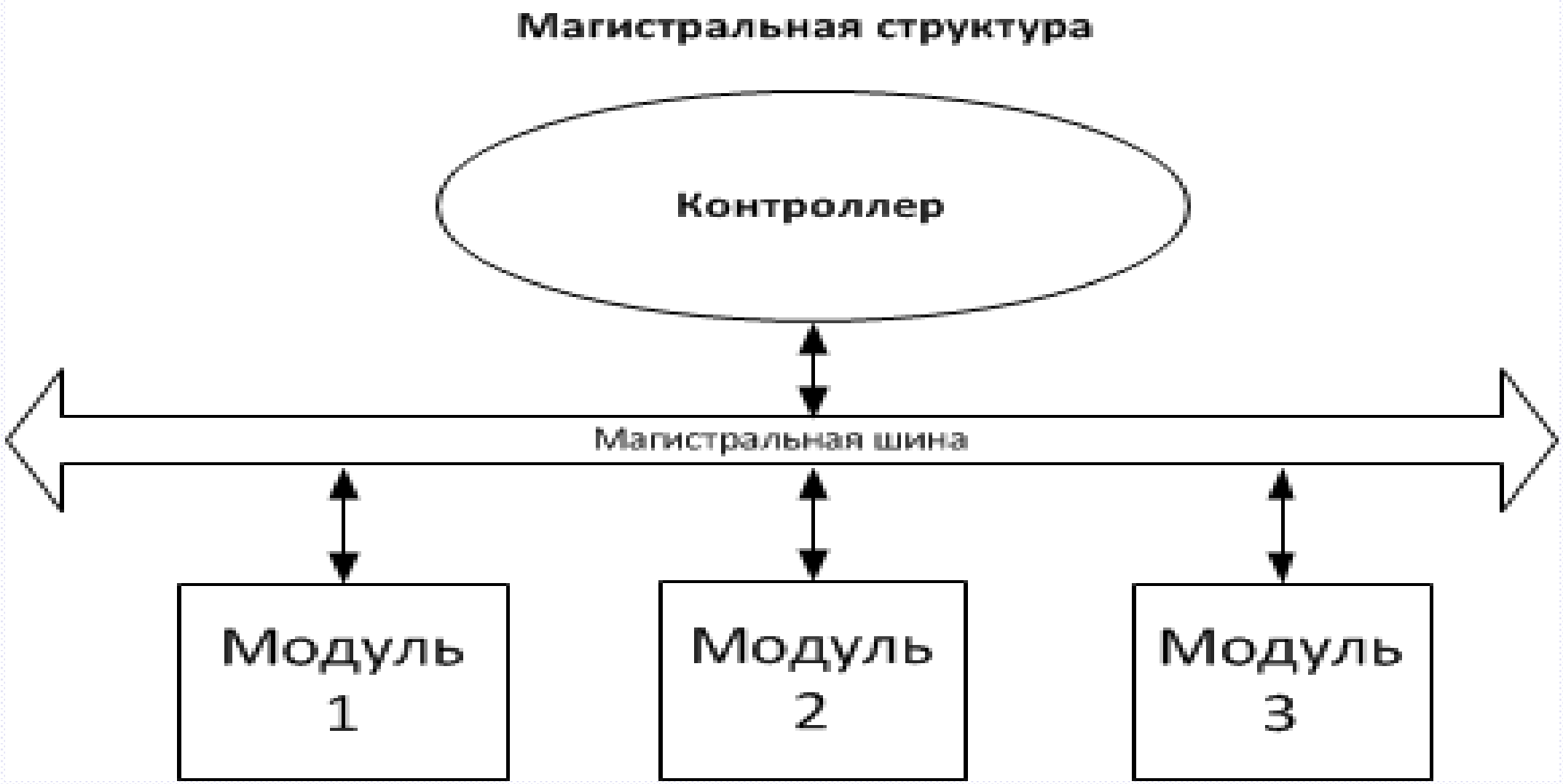


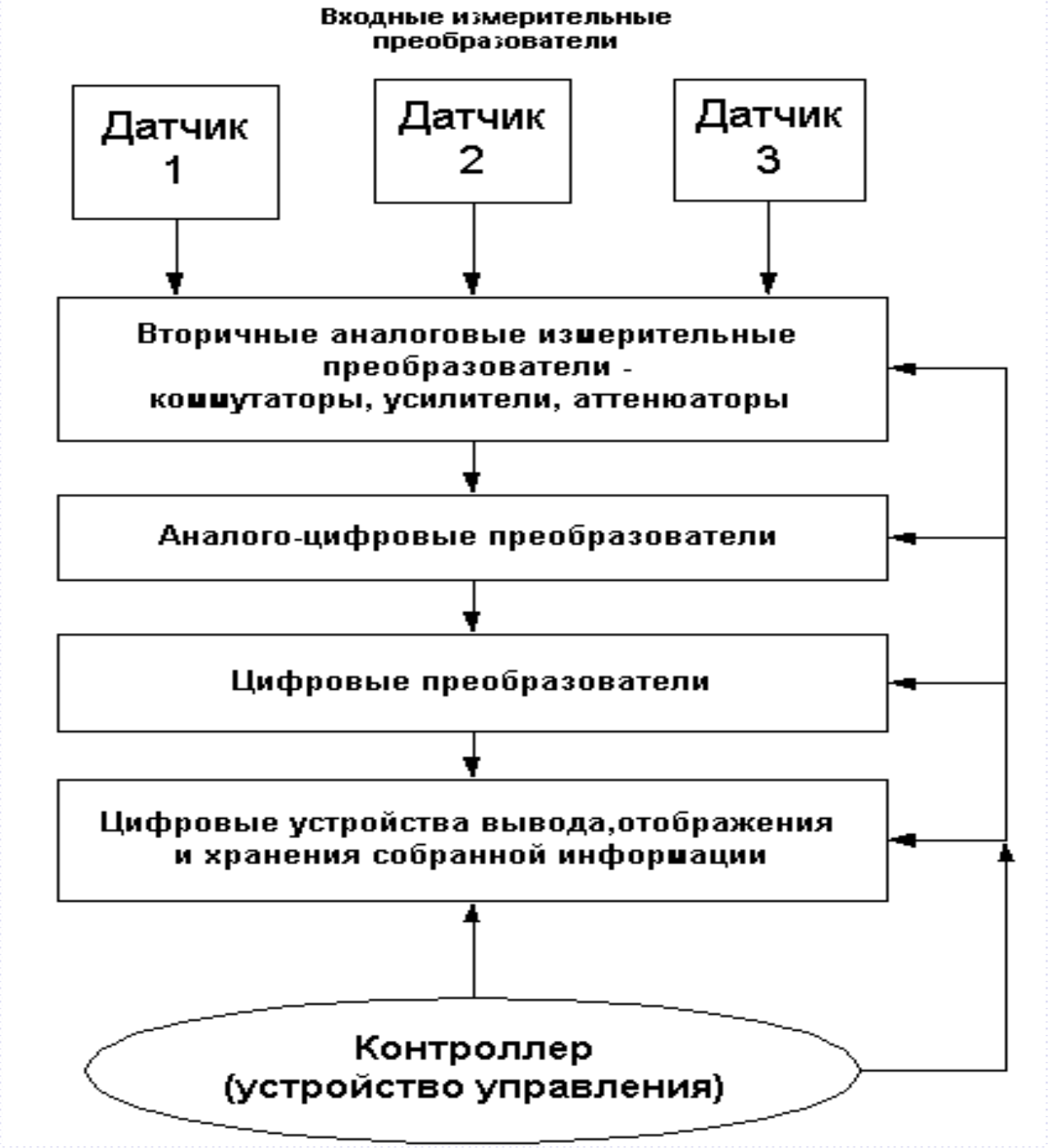
Структурные схемы ИС

1. Радиальная структура - для простых систем с малым количеством модулей. Требует отдельного порта для каждого модуля на контроллере. Скорость обмена информацией может быть велика и зависит от быстродействия каждого канала связи.

2. Каскадная (цепочечная) структура. Каждый модуль передает всю информацию. Новые модули легко подключаются. Управление децентрализовано (функции контроллера выполняет один из модулей). Экономичная структура, применяется для автономных ИС.

3. Магистральная структура – информация передается по единой шине интерфейса. Требуется адресация модулей (кто приемник – кто передатчик), что замедляет обмен и усложняет управление. Для малых систем избыточна. Быстрее, чем каскадная структура



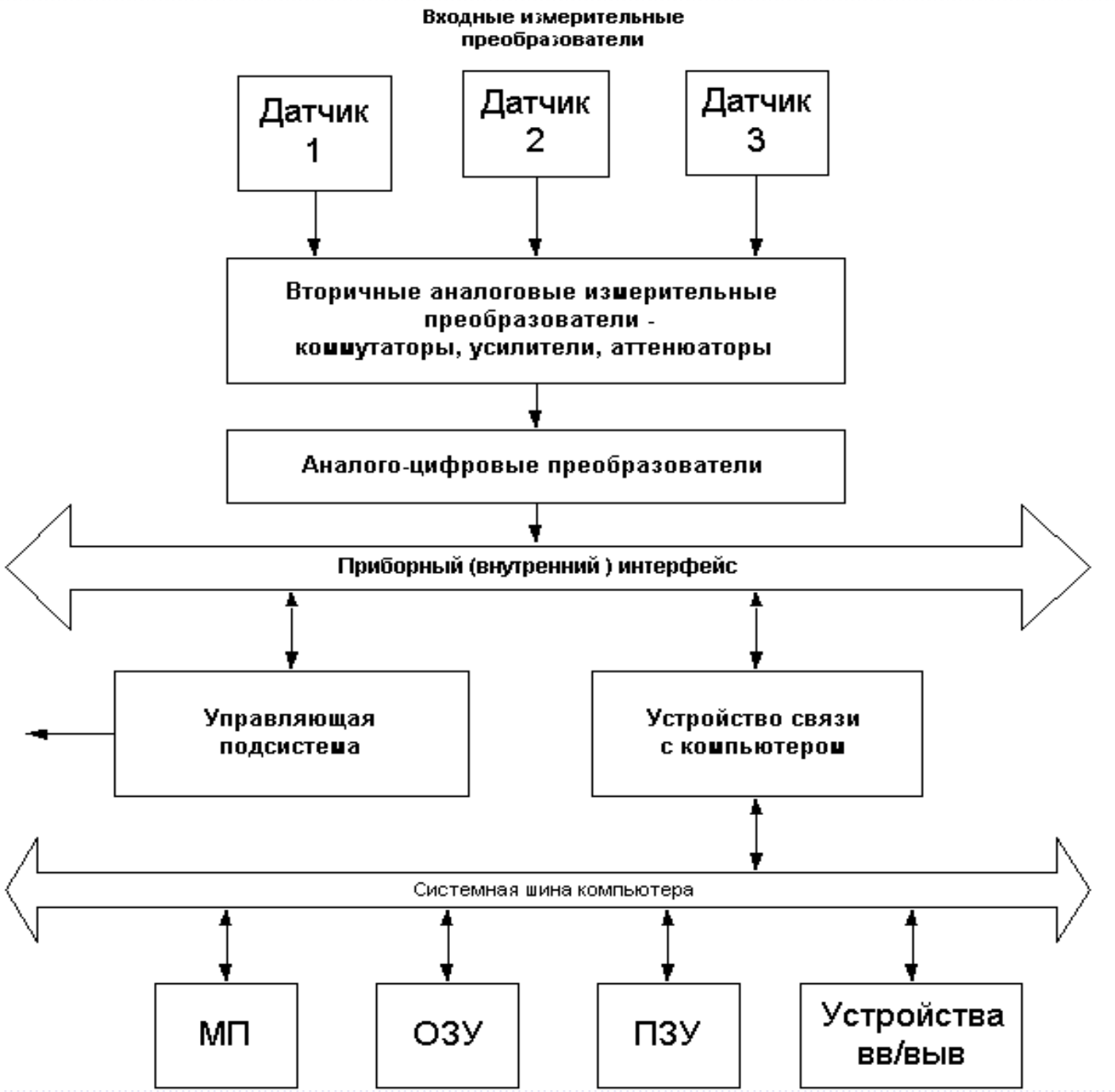


Информационно-измерительные системы (ИИС)

- для сбора и передачи измерительной информации.

Функции ИИС:

- Проведение измерений (сравнение получаемых сигналов с единицами измерений и получение количественных оценок);
- Сбор измерительной информации:
- Преобразование информации;
- Хранение информации;
- Несложная обработка информации;
- Представление информации на выходных устройствах;
- Управление системой сбора информации.

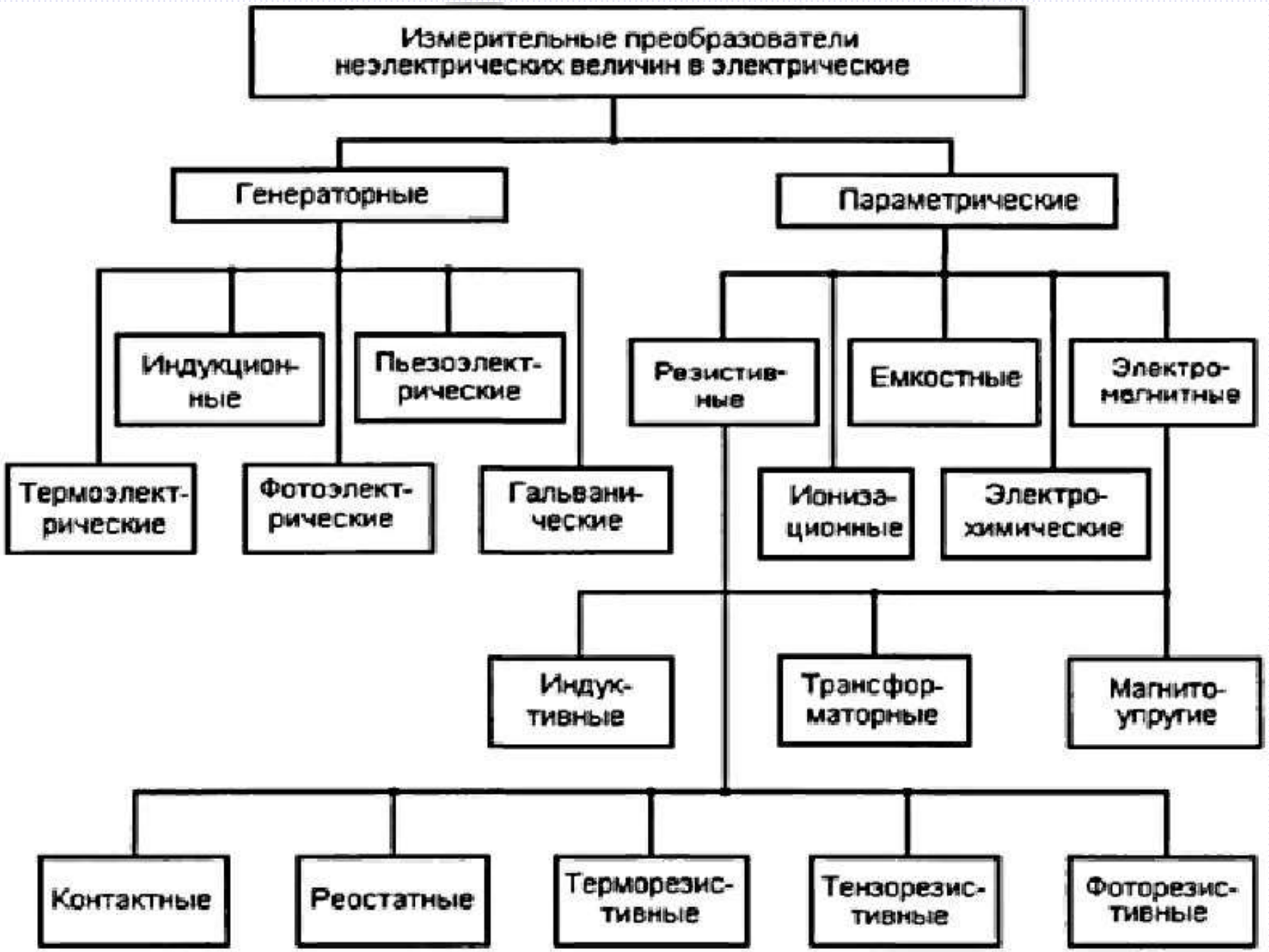


Измерительно – вычислительные комплексы (ИВК) -

включает в себя компьютер, который берет на себя как функцию контроллера, так и функции управления и обработки информации

Дополнительные к ИИС функции ИВК:

- реализация прямых, косвенных и совместных измерений;
- программное управление процессом измерения;
- обработки опытных данных;
- представления результатов измерений в требуемом виде



Классификация первичных модулей информационно-измерительных систем (датчиков неэлектрических величин)

Интерфейсы измерительных систем

Интерфейс - это совокупность механических, электрических и программных средств, обеспечивающих взаимодействие составных частей ИС. Конструктивно может включать в себя линии передачи данных, активные и пассивные согласующие устройства и блоки

По *принципу обмена информацией* :

Параллельные - имеют шины (совокупность линий передачи бинарных кодов), которые передают целое слово цифровых данных сразу. Быстродействующие, но громоздки и имеют низкую помехозащищенность.

Последовательные – передают цифровую информацию побитно, пакетами и сравнительно с параллельными - медленно. Применяют при передаче на большие расстояния.

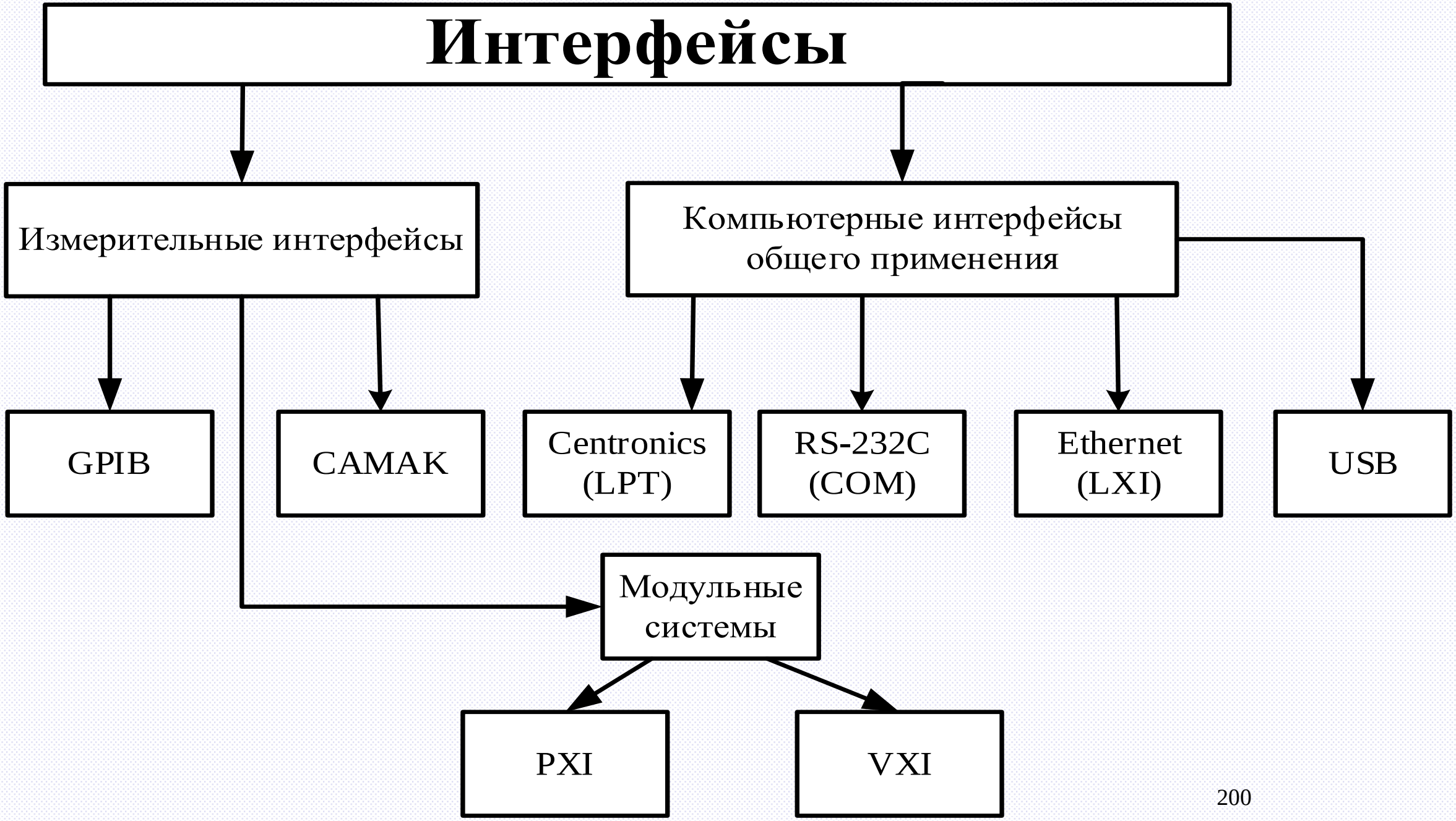
Параллельно-последовательные – комбинация из двух первых типов. Сочетают более высокое быстродействие и относительную простоту.

По ***способу передачи*** информации от модуля к модулю интерфейсы делят на

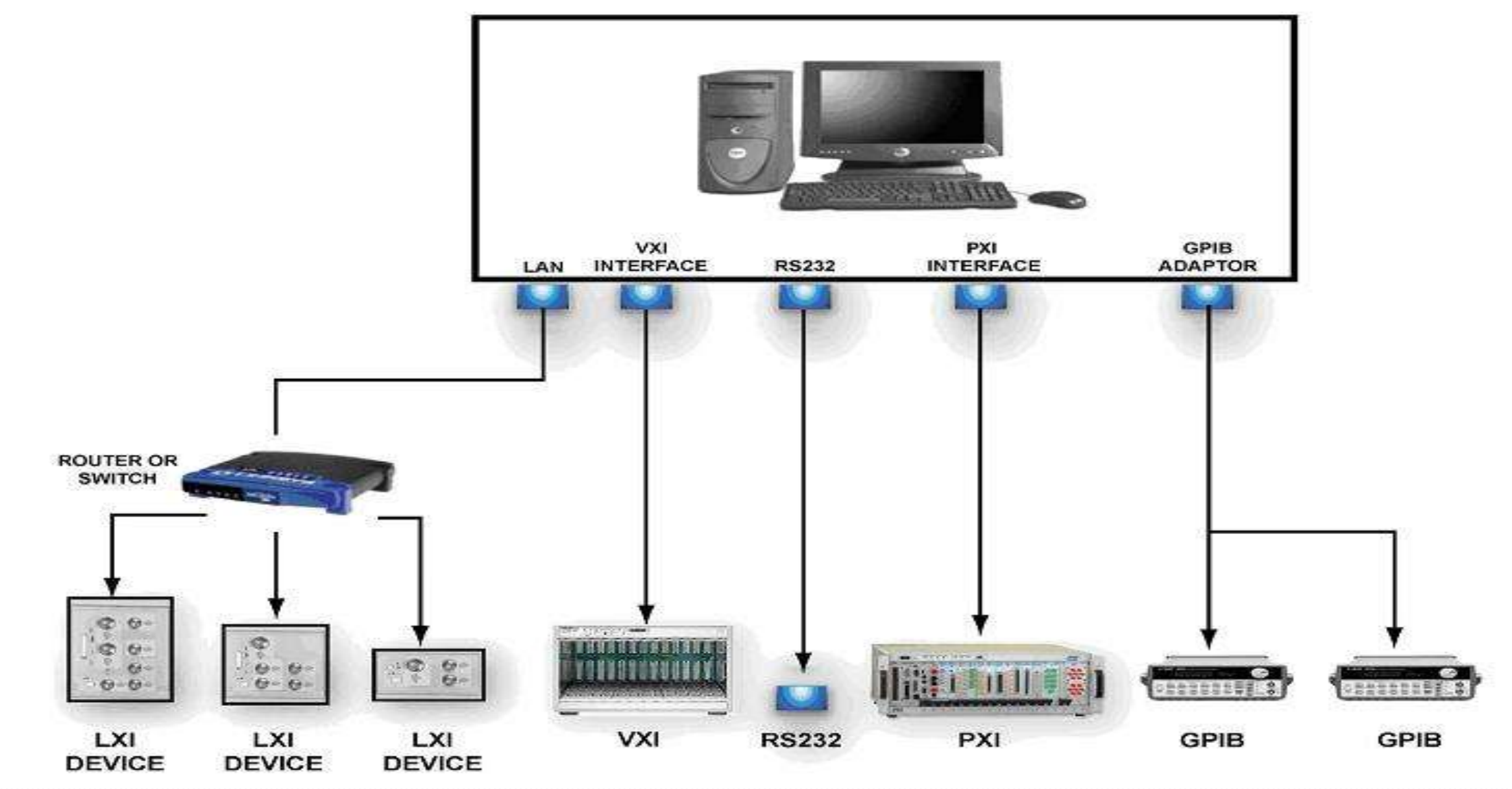
- *Синхронные*- передача информации в такт со специальными синхросигналами. Все модули передают информацию *с одинаковой* скоростью.
- *Асинхронные -* предполагают квитирование передачи (передатчик ожидает подтверждения от приемника). В таких системах можно использовать модули с различным быстродействием.

По ***режиму обмена*** информацией интерфейсы делят на

- *дуплексные*, в которых передача может идти одновременно в обе стороны
- *симплексными* - в интерфейсе возможна в данный момент времени передача только от одного из модулей;
- *полудуплексный* режим - любой из модулей может начать работу, если интерфейс свободен.
- *мультиплексный* режим работы – в каждый момент времени связь может быть между любой парой модулей в системе (в магистральном интерфейсе, например).


Интерфейсы
Измерительные интерфейсы
Компьютерные интерфейсы общего применения
GPIB
CAMAK
Centronics (LPT)
RS-232C (COM)
Ethernet (LXI)
USB
Модульные системы
PXI
VXI

Измерительно-вычислительный комплекс с персональным компьютером и основными измерительными интерфейсами



Последовательный интерфейс RS-232C

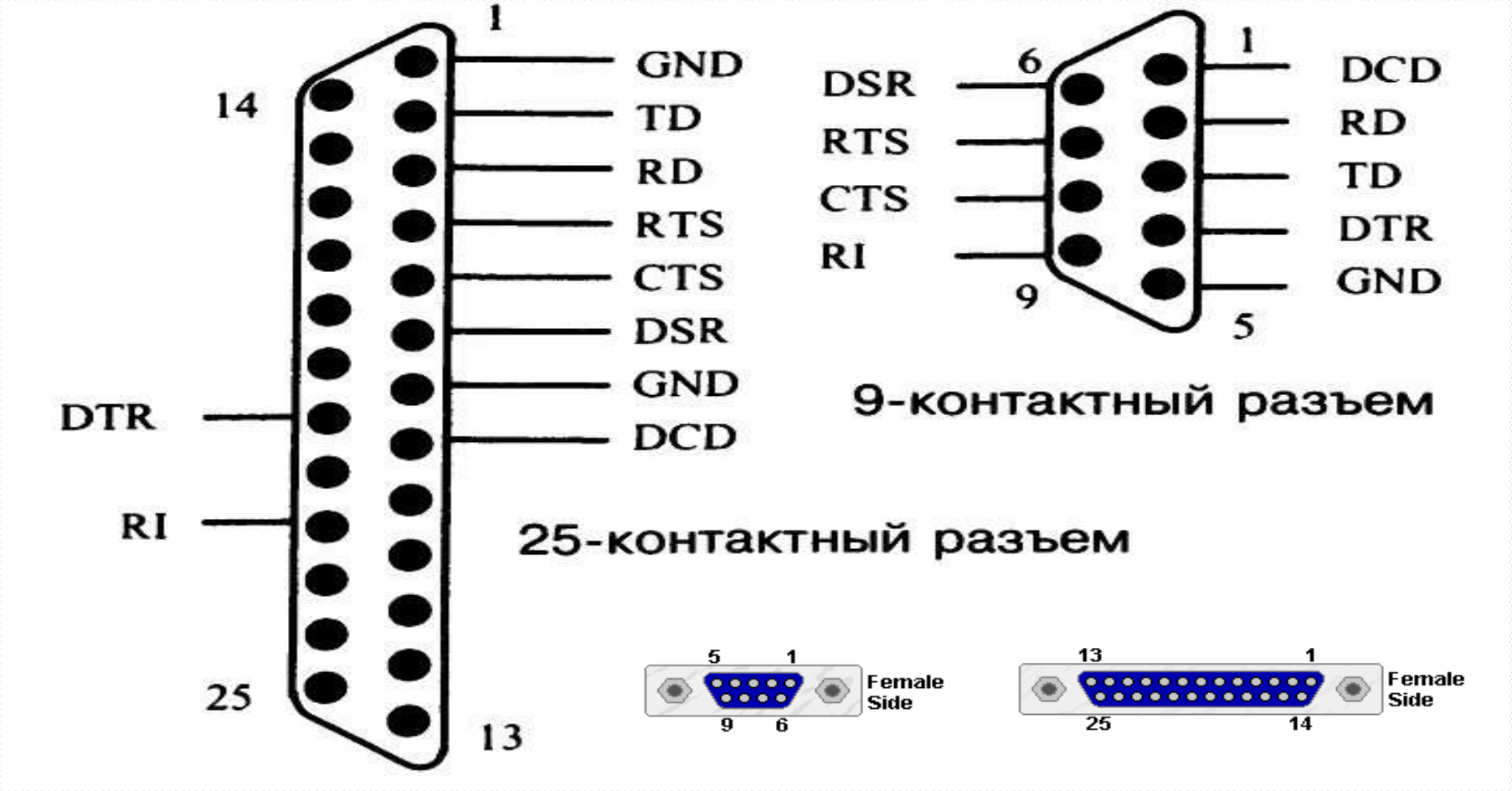
RS-232. 1962 г. Electronic Industries Association (EIA)- для использования в ЭВМ с целью передачи на относительно большие расстояния при минимальном количестве линий в шине.

1969 г. – третья модификация (RS-232C). Достоинства – минимальная стоимость, способность использовать телефонные линии и другие двухпроводные сети. Недостатки – мала скорость обмена, требуются достаточно сложные устройства управления передачей и приемом информации.

Интерфейс соединяет устройства двух возможных типов:

- DTE (Data Terminal Equipment) — ООД (Оконечное Оборудование Данных),
- DCE (Data Communications Equipment) — ОПД (Оборудование Передачи Данных)

В измерительных системах DTE (ООД) — это компьютер, а DCE (ОПД) — это измерительный прибор,



Конструктивно интерфейс предусматривает разъемы DB25 или DB9. Вилка (male - "папа") обозначается как DB-9P (DTE устройство – компьютер), а розетка (female - "мама") - как DB-9S (DCE-устройство- прибор). На приборе может устанавливаться и вилка , что позволяет использовать кабель с одинаковыми разъемами «мама».

Назначение линий разъема:

1 - **FG** (frame ground) – защитное заземление;

2 - **TD (-TxD)** (transmitted data) – передаваемые данные;

3 - **RD (-RxD)** (received data) – принимаемые данные;

4 - **RTS** (request to send) – запрос передатчика;

5 - **CTS** (clear to send) – сброс передатчика;

6 - **DSR** (data set ready) – готовность модема;

7 - **GND** (**SG**) (signal ground) – сигнальная земля;

8 - **DCD** (data carrier detect) – обнаружение несущей;

20 - **DTR** (data terminal ready) – готовность терминала;

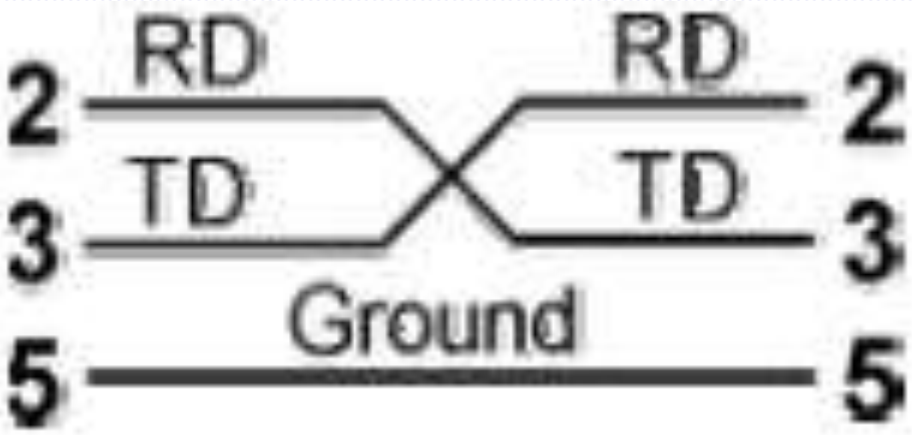
22 - **RI** (ring indicator) – указатель вызовов.

Аппаратное квитирование приема и передачи - сигналы RTS и CTS.

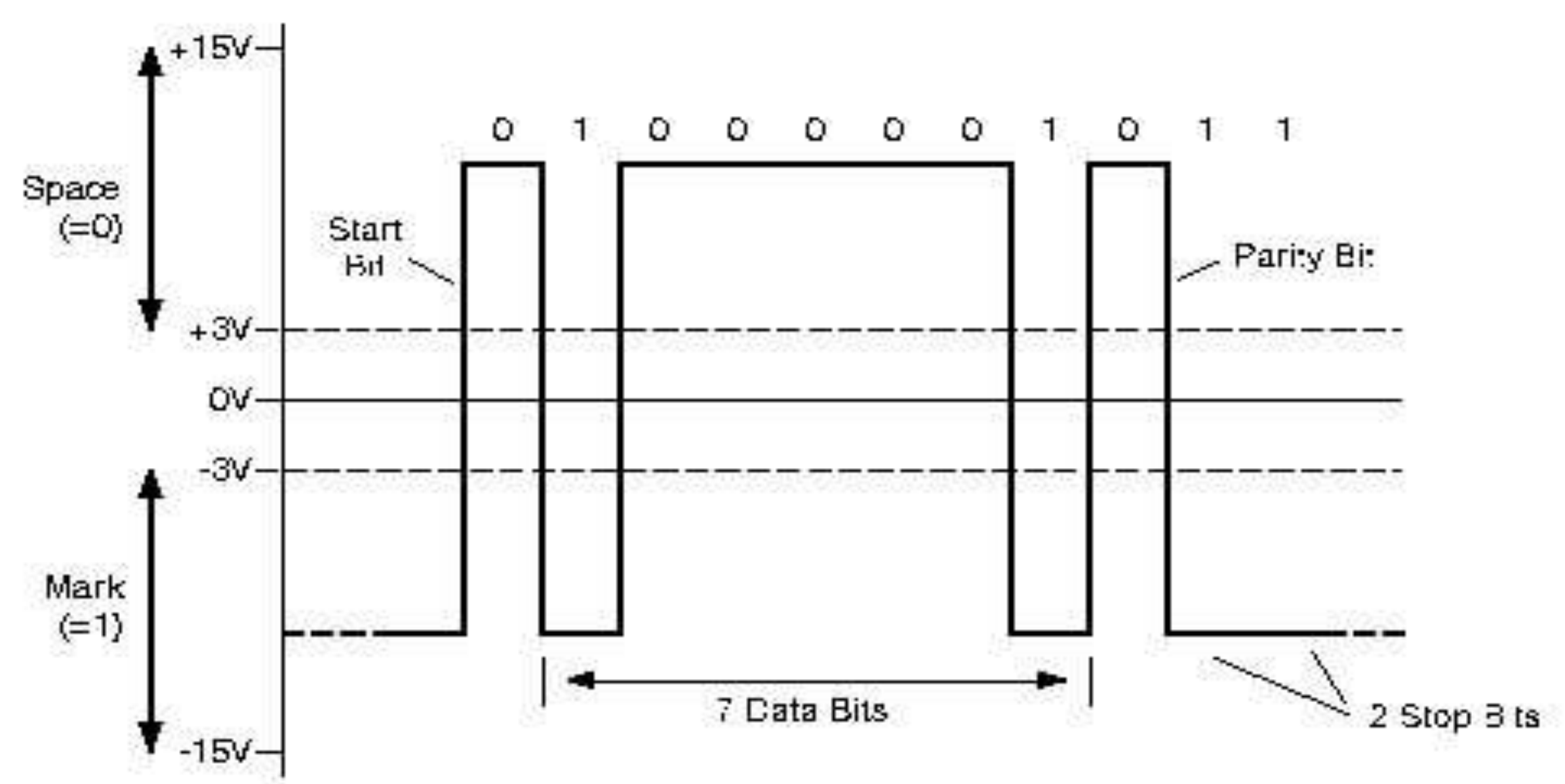
Передатчик устанавливает сигнал RTS, приемник, обнаружив его, отвечает сигналом CTS. Последовательность битов передается по линиям –RxD, -TxD.

Особенности интерфейса RS-232C

- Всего необходимо 10 сигналов (а без FG – 9), что позволяет использовать разъем DB9.
- Интерфейс не обеспечивает гальванической развязки соединяемых модулей.
- Логической единице соответствует уровень напряжения на входе приемника –12...-3 В.
- Логическому нулю соответствует диапазон +3...+12 В.
- –3...3 В - зона нечувствительности, обеспечивающая гистерезис зоны распознавания битов и повышающая помехозащищенность.
- Стандарт определяет максимальную длину кабеля 15 метров при скорости 9600 бит/с.



Для соединения двух DTE-устройств используют нуль-модемные кабели, в которых провода "перекрещиваются" в соответствии с назначением сигналов. Всего три линии!!



Уровни пакета сигналов интерфейса RS-232C

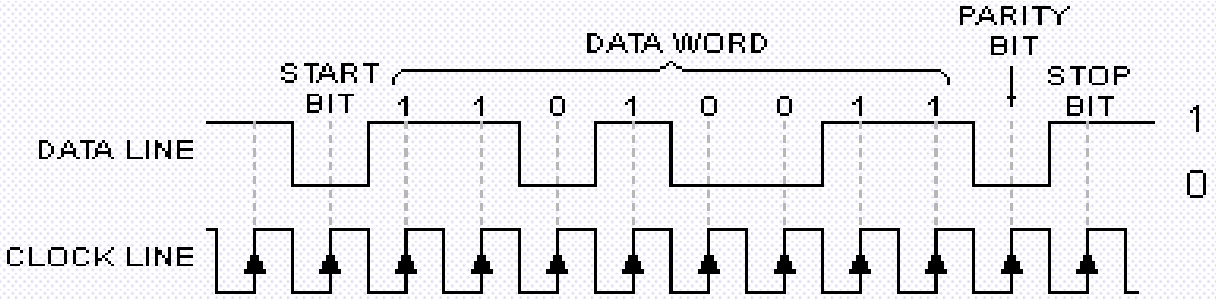
Протокол обмена данными предполагает асинхронный метод передачи. Длительность передачи одного двоичного разряда выбирается из стандартных скоростей передачи 50,75, 110,150, 300, 600,1200, 2400,9600,19200, 38400, 57600, 115200 бод/сек (baud rate).

NB! Бод – количество *полезной* информации , бит – количество двоичных единиц *всей* информации, включая служебную.)

бод



Формат пакета байта данных



Связь пакета данных с тактовой частотой

Реализуют протокол RS-232C микросхемой приемопередатчика UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter), которую в модуле и в контроллере программируют, задавая скорость, наличие бита четности, количества битов в числе, количество стоповых битов).

Возможен как **дуплексный** режим работы (с двумя линиями связи), так и **симплексный** или полудуплексный – с одной линией.

Для управления потоком данных используются два варианта протоколов – **аппаратный** (с использованием сигналов RTS/CTS) и **программный** XON/XOFF.

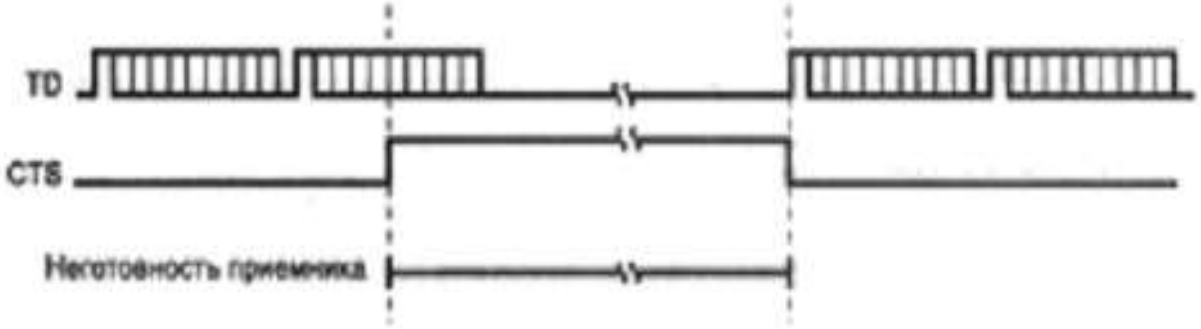
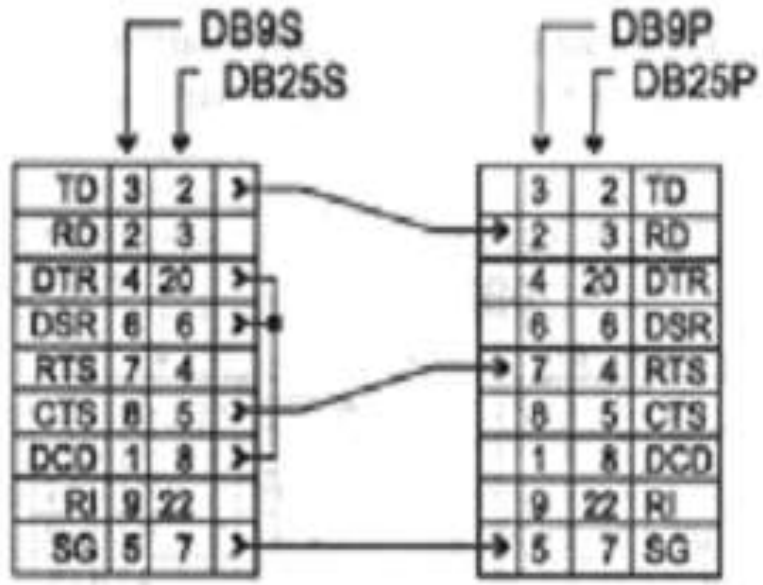
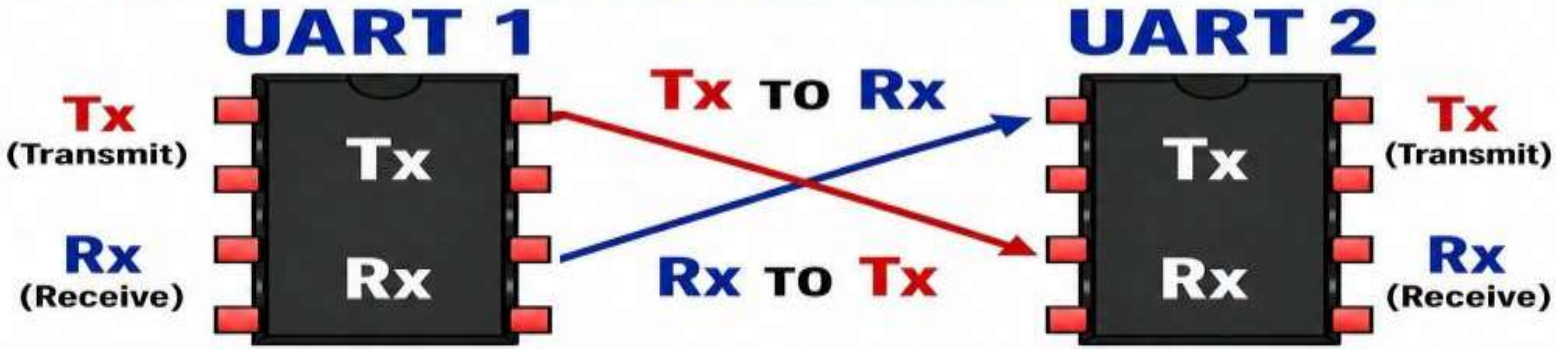


Рис. 1. Аппаратное управление потоком



UART COMMUNICATION

2-WIRE ASYNCHRONOUS SERIAL

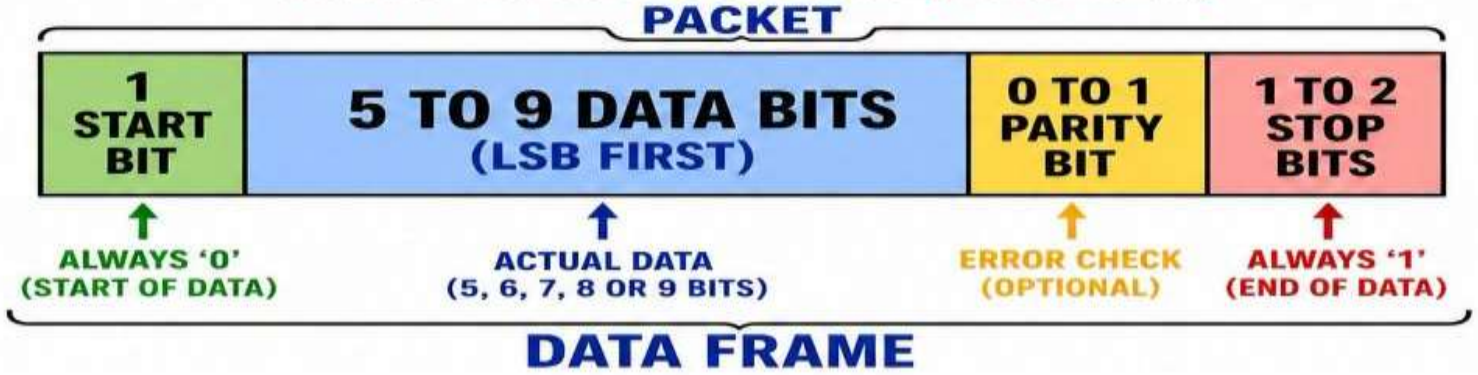


- **Tx** (Transmit): Sends Data
- **Rx** (Receive): Receives Data
- Both Devices Must Have Same Settings
  (Baud Rate, Data Bits, Parity, Stop Bits)

COMMON SETTINGS (EXAMPLE)

BAUD RATE	:	9600 bps
DATA BITS	:	8
PARITY	:	NONE
STOP BITS	:	1

UART DATA FRAME (PACKET)



В программном методе применяют квитирование передачи и приема байтами XOFF(13h) и XON (11h). Если приемник не может принимать данные, он выставляет сигнал прерывания XOFF в обратном канале связи RxD. Передатчик приостанавливает работу. Затем, когда приемник становится готовым к работе, он передает сигнал XON. Преимущество – не требуется дополнительных соединительных проводов – сигналы RTS/CTS замыкаются прямо на разъемах передатчика и приемника

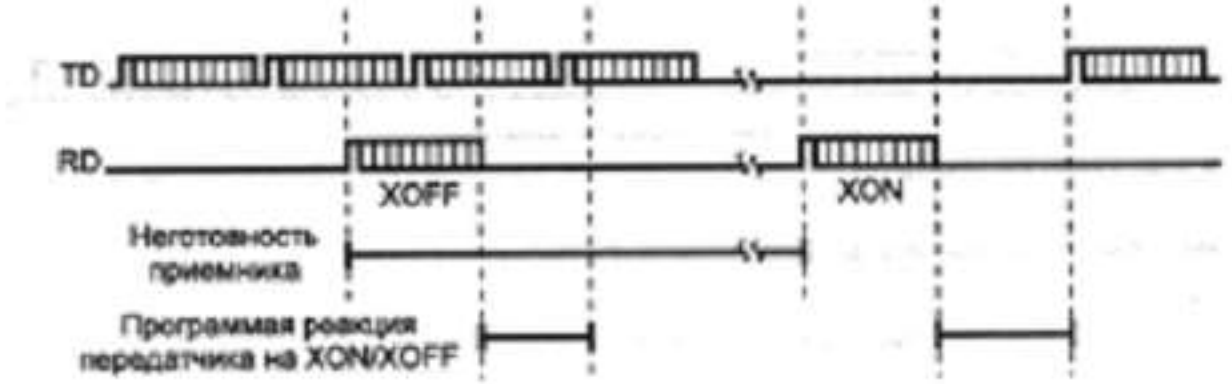
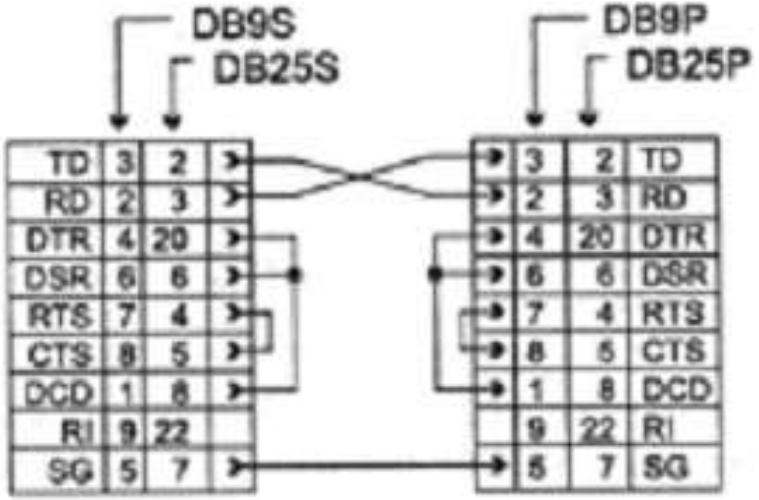


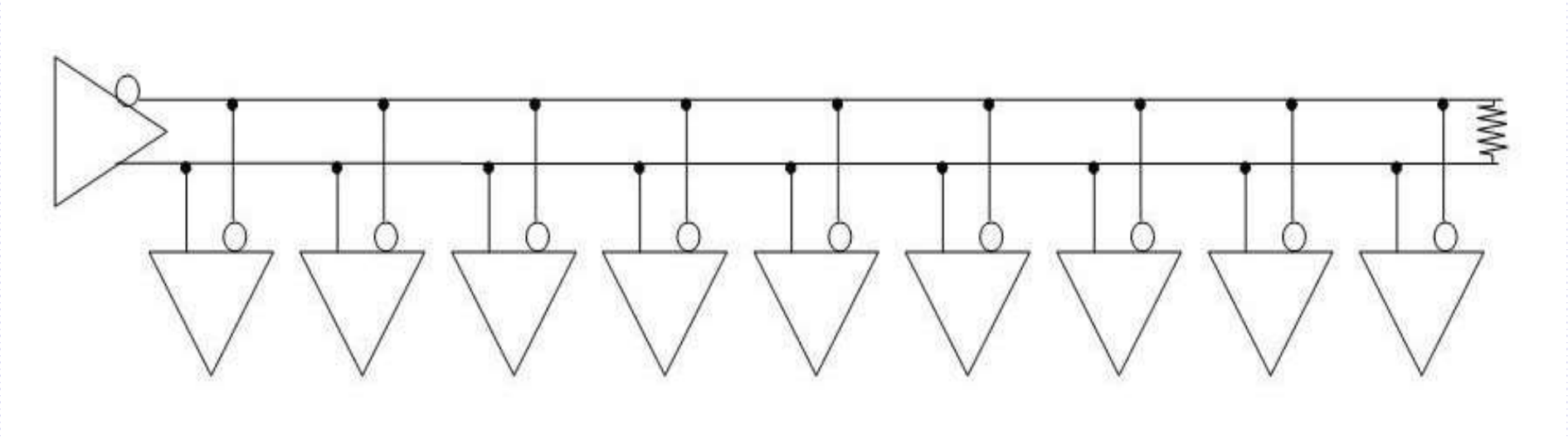
Рис. 3. Программное управление потоком XON/XOFF



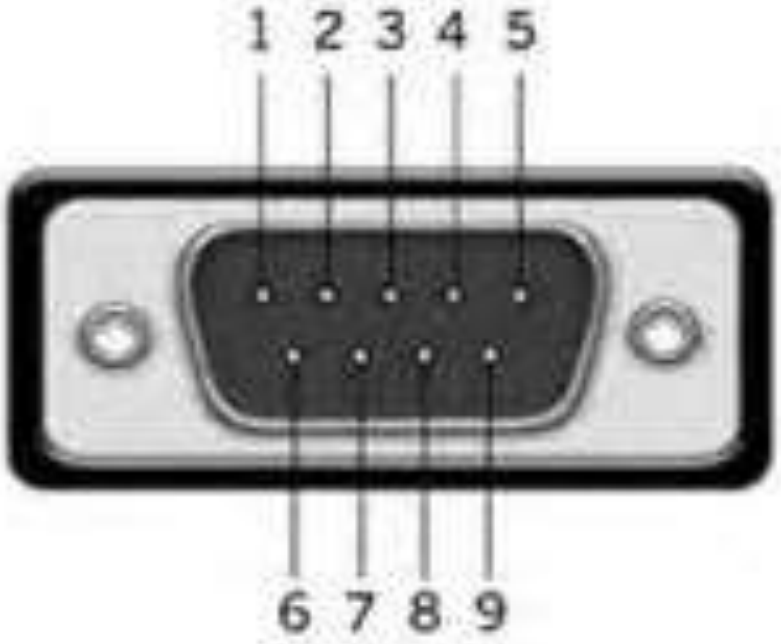
Интерфейсы RS422 и RS485

Повышение скорости передачи и увеличение максимальной длины линии передачи достигается за счет использования дифференциального напряжения на сигнальных линиях A и B. Пауза или логический нуль кодируются превышением напряжения линии A над линией B на 5 В (TTL уровни). Для маркера или логической единицы напряжение B выше, чем напряжение A на 5 В. Допускает подключение к одному передатчику до 10 приемников. Полный дуплекс по двум линиям. Высокая помехоустойчивость.

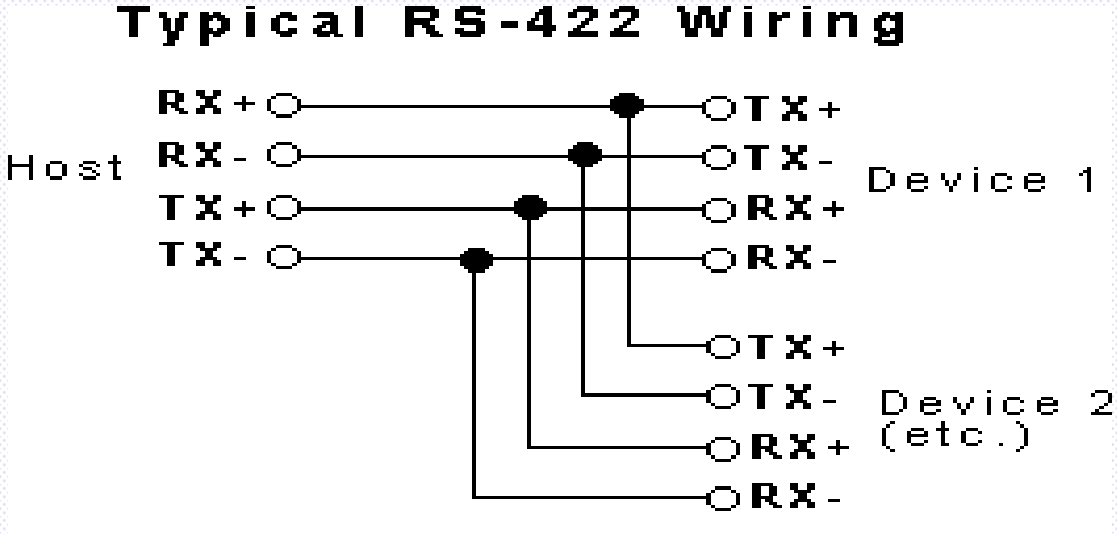
Интерфейс RS422



TXD- : Pin 1
TXD+ : Pin 2
RTS- : Pin 3
RTS+ : Pin 4
GND : Pin 5
RXD- : Pin 6
RXD+ : Pin 7
CTS- : Pin 8
CTS+ : Pin 9

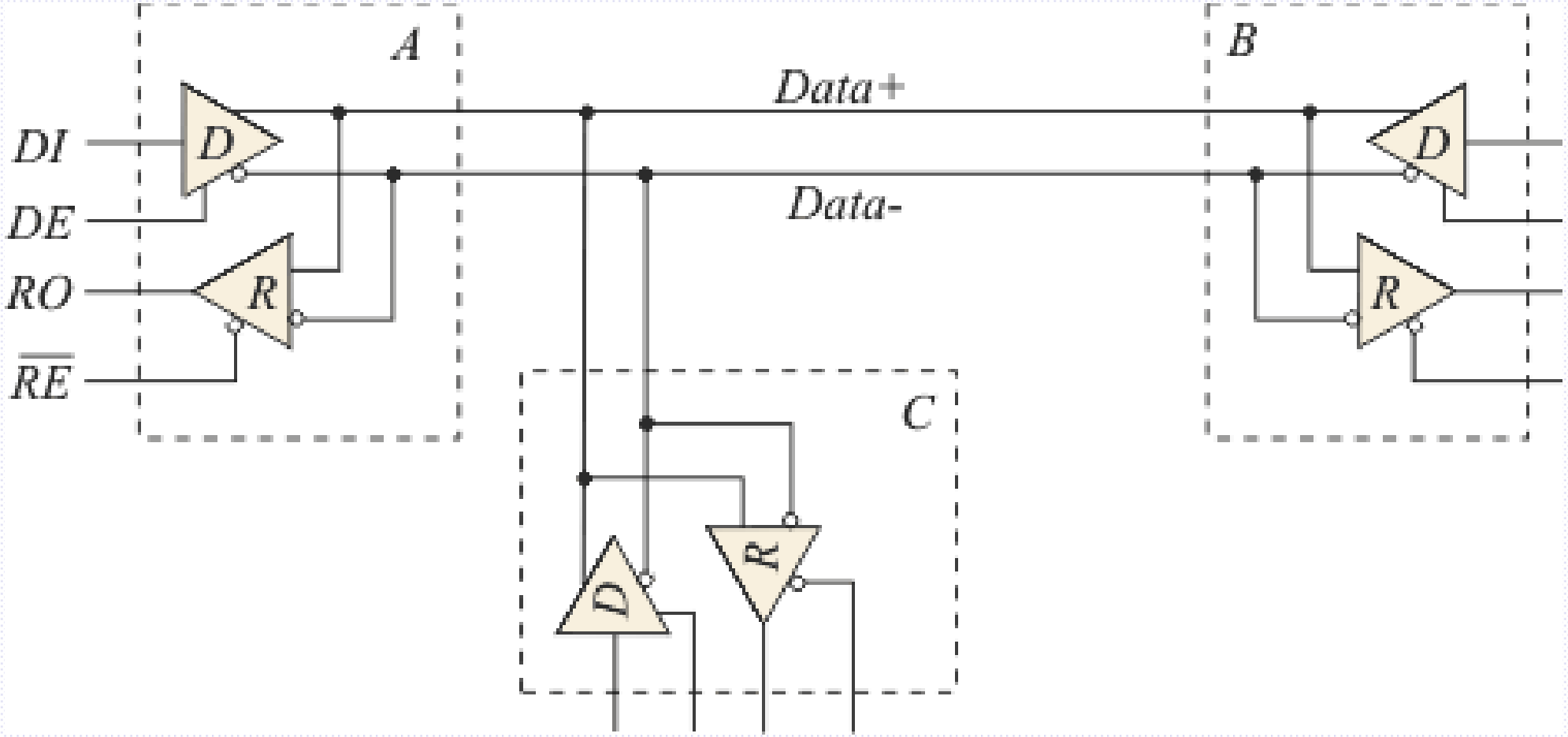






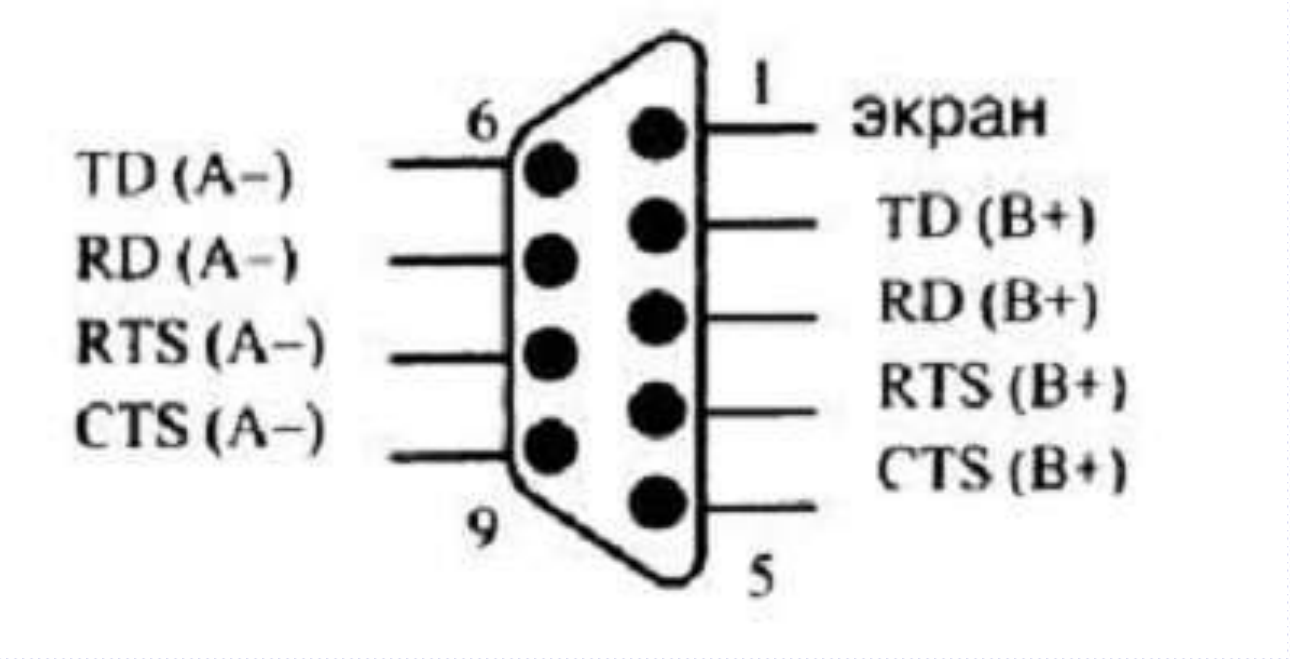
Кабель интерфейса RS422

Интерфейс RS485



Интерфейс RS485 позволяет подключать к двухпроводной скрученной линии связи (twisted pair -TP) до 32 приемников и передатчиков. Использует тристабильную логику (с Z-режимом) на выводах шинных формирователей модулей. Длина канала связи до 1200 м, скорость передачи до 10 Мбод/с.

Используются протоколы типа Master/Slave. Два типа связи – с одной ТР (витой парой) (полудуплекс) и с двумя линиями ТР (full duplex)



Разъем интерфейса RS 485.
TD,RD – линии А и В передачи и приема,
RTS,STS – линии квитирования приема/передачи

Логическая единица (Mark) соответствует отрицательному напряжению -1.5... –6В, логический нуль (Space) представляется положительным напряжением +1.5.... +6В, входное сопротивление приемника должно быть более 12 kОм. Скрученная пара должна иметь волновое сопротивление порядка 120 Ом и требует согласованных нагрузок на каждом конце

Сравнение последовательных интерфейсов

	RS232	RS422	RS485
Тип передачи	Несимметричная линия	Дифференциальная линия	Дифференциальная линия
Общее количество передатчиков и приемников	1 передатчик 1 приемник	1 передатчик 10 приемников	32 передатчика 32 приемника
Максимальная длина кабеля	До 15 м	До 1200 м	До 1200 м
Максимальная скорость передачи	20kb/s	10Mb/s-100Kb/s	10Mb/s-100Kb/s
Максимальное напряжение передатчика	+/-25V	-0.25V to +6V	-7V to +12V
Нагрузочное сопротивление передатчика	3k to 7k	100 Ом	54 Ом
Входное напряжение приемника	+/-15V	-10V to +10V	-7V to +12V
Порог нечувствительности приемника	+/-3V	+/-200mV	+/-200mV
Входной импеданс приемника	3k to 7k	4k min.	>=12k

Интерфейс USB








USB интерфейс (протокол USB 1.0) был разработан в 1996 г. (фирмами Intel, Microsoft, Philips, US Robotics) для соединения персонального компьютера и периферийных устройств по системе Plug_and_play «подключи и работай», Главное достижение USB шины - она дала флешку. Израильская фирма M-Systems Ltd. в 1999 году выпустила первую usb-флешку объёмом 8Мб, которая называлась DiskOnKey.

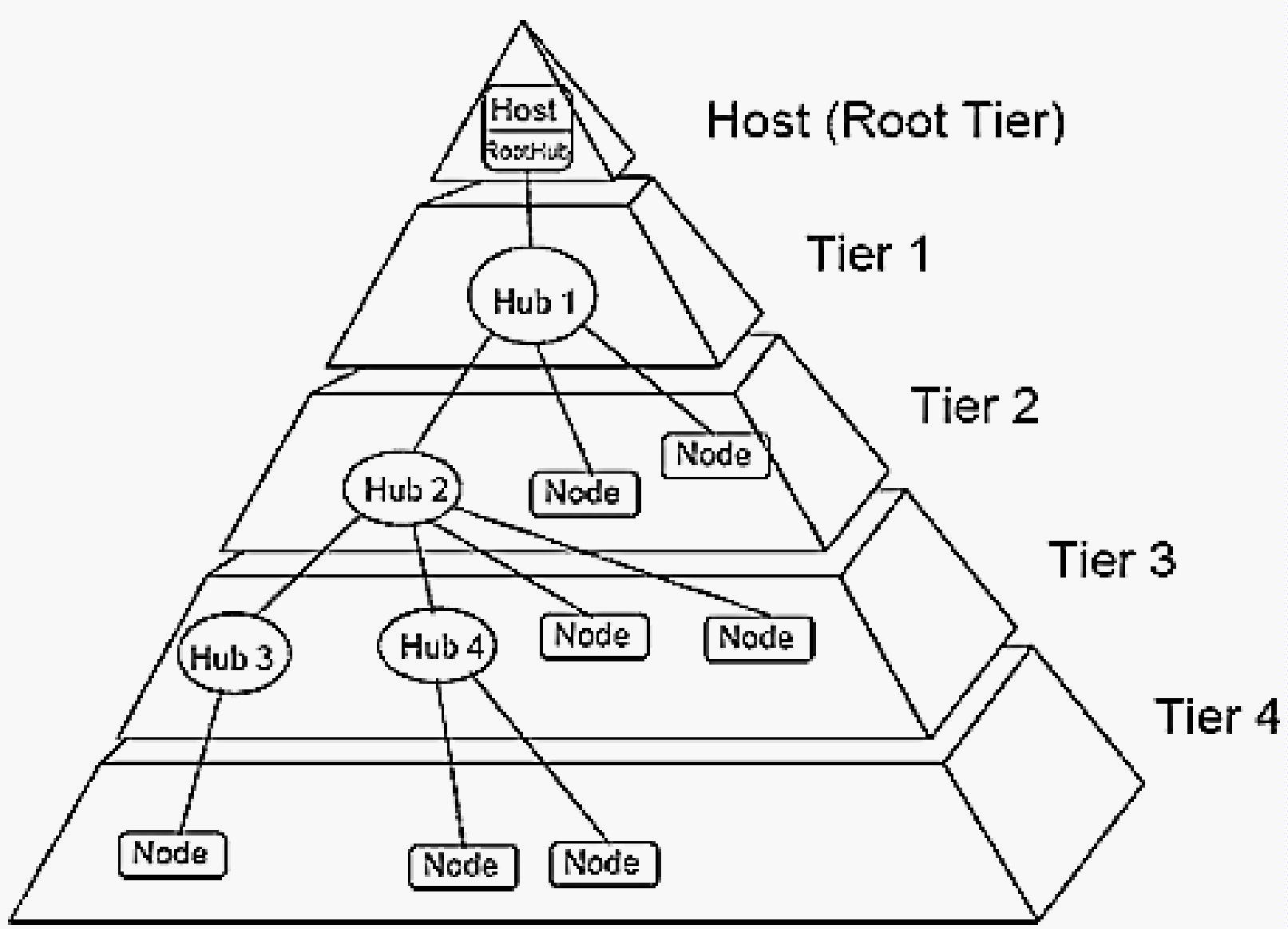
Протокол 1.0 обеспечивает скорость передачи до 1.5 Мбайт/с (12 Мбод/с). В 2000 году - спецификация USB 2.0 с поддержкой скорости 60 Мбайт/с (480 Мбод/с) (в 40 раз больше чем в USB 1.0). USB 2.0 является обратно совместимой со всеми предыдущими версиями USB.

Новый высокоскоростной стандарт USB 3.0 вышел в 2008 году. Уложиться в 4 провода не удалось, добавили 5 новых проводов. К 2013 году USB 3.0 стал массовым.

Физическое соединение устройств USB -топология многоярусной звезды (радиальная структура). Центром звезды является хаб (hub), к нему подключаются устройства (обозначаемые Function) и другие хабы. Различают низкоскоростные Low Speed устройства (до 1.5 Мбод/с) и полноскоростные Full Speed – до 12 Мбод/с. Для USB2.0 устройства высокоскоростные – до 480 Мбод/с

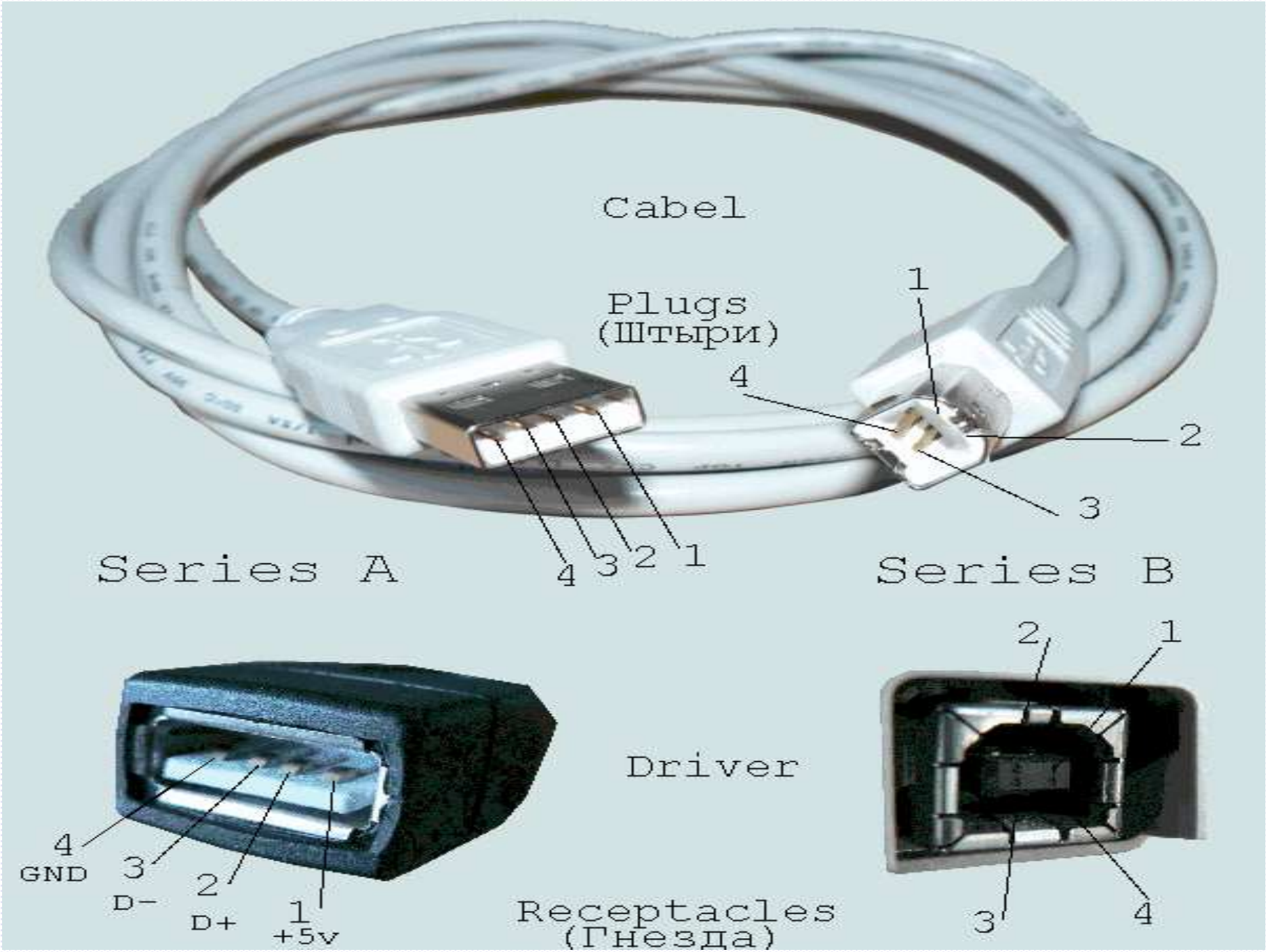
В системе имеется один хост-контроллер , расположенный в вершине пирамиды устройств и хабов. Максимальное количество ярусов, предусмотренное спецификацией USB v.1.1 , равно четырем. Максимальное количество устройств сети (хабов и функций) равно 127. Каждое устройство имеет свой адрес. Технология **On-The-Go Supplement (OTG)**. позволяет выполнять передачу данных между одноранговыми устройствами без участия полнофункционального хост-контроллера. **Wireless Universal Serial Bus** Specification реализует беспроводное соединение USB устройств с компьютером по радиоканалу.

Пирамида сети USB



Хотя теоретическая максимальная пропускная способность USB 2.0 составляет 480 Мбит/с (60 Мбайт/с), на практике обеспечить пропускную способность, близкую к пиковой, не удаётся (максимум 45 Мбайт/с[15], чаще до 30 Мбайт/с). Это объясняется тем, что шина USB является полудуплексной — для передачи данных в обе стороны используется всего одна витая пара, поэтому за один такт данные могут быть переданы только в одну сторону, и, соответственно, для двунаправленного обмена данными требуется 2 такта.

	USB 1.1	USB 2.0
Макс. длина одного кабеля	3.0 м	5.0 м
Макс. суммарная длина (без учета длины кабеля устройства)	18 м	30 м
Макс. суммарная длина (с учетом длины кабеля устройства)	15 м + длина кабеля устройства	25 м + длина кабеля устройства


Cabel
Plugs
(Штыри)
1
4
2
3
Series A
4 3 2 1
Series B
GND
4
3
D-
2
D+
1
+5v
Driver
2
1
3
4
Receptacles
(Гнезда)

Недостаток: USB соединители не имеют надежной защиты от внешних помех. У них нет прочного крепления разъемов (нет винтов) а максимальная длина кабеля – 30 м, причем с применением активных повторителей. Поэтому применение такой шины в условиях промышленных измерительных систем ограничено. Современные измерительные приборы, как правило, предусматривают USB порты для управления прибором и связи с компьютером (типа B) и вывода информации (типа A) для подключения внешних флеш-накопителей. Применяют также переходные устройства (мосты-бриджи) между последовательными и параллельными измерительными интерфейсами и USB шиной.

Пример виртуального прибора на основе USB интерфейса: USB-модуль ввода–вывода информации фирмы National Instruments (DAQ board NI 6221USB)

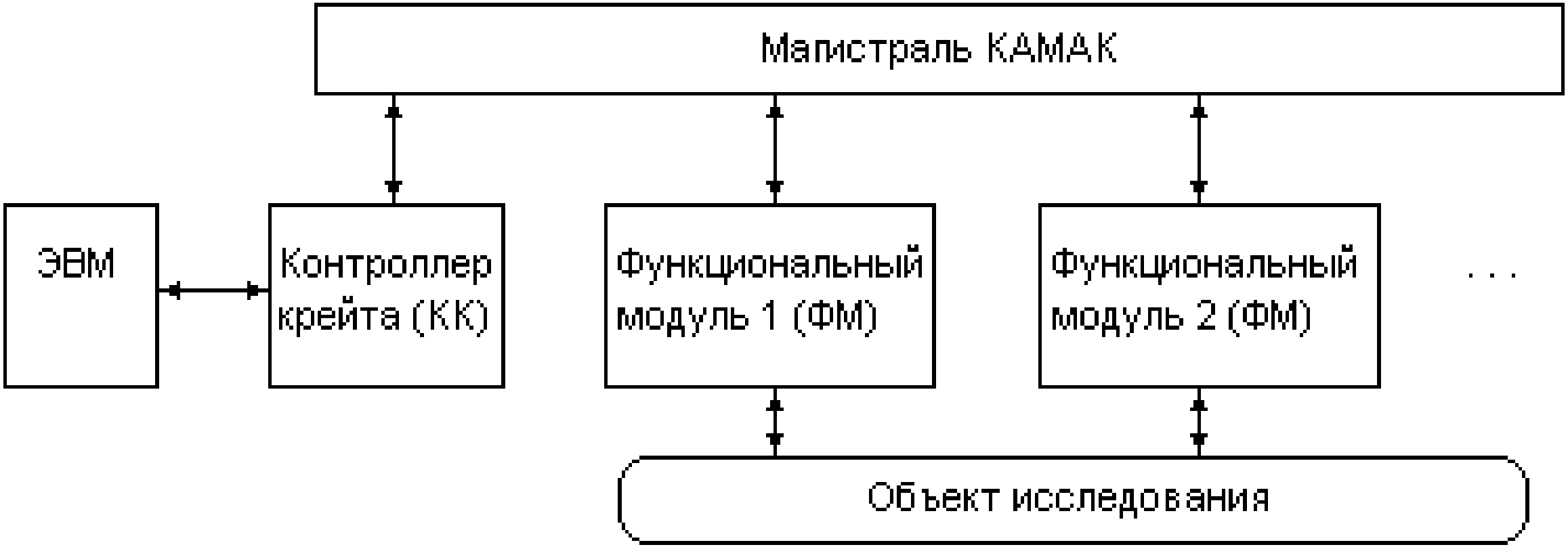


Магистральный интерфейс КАМАК (CAMAC)

- Стандарт КАМАК (CAMAC - Computed Aided for Measurement, Automation and Control) разработан комитетом по стандартам в области ядерной электроники (ESONE) в 1968 году. Для применения в физике элементарных частиц для автоматизации экспериментов
- Первая магистрально – модульная (функционально-модульная) агрегатная система реального времени, предназначенная для сбора, накопления, преобразования и обработки измерительных и управляющих сигналов в ИС, соединенная с ЭВМ (компьютером).
- Стандарты IEEE 583 и ГОСТ 26.201-80, 26.201.1-94 и 26.201.2-94.

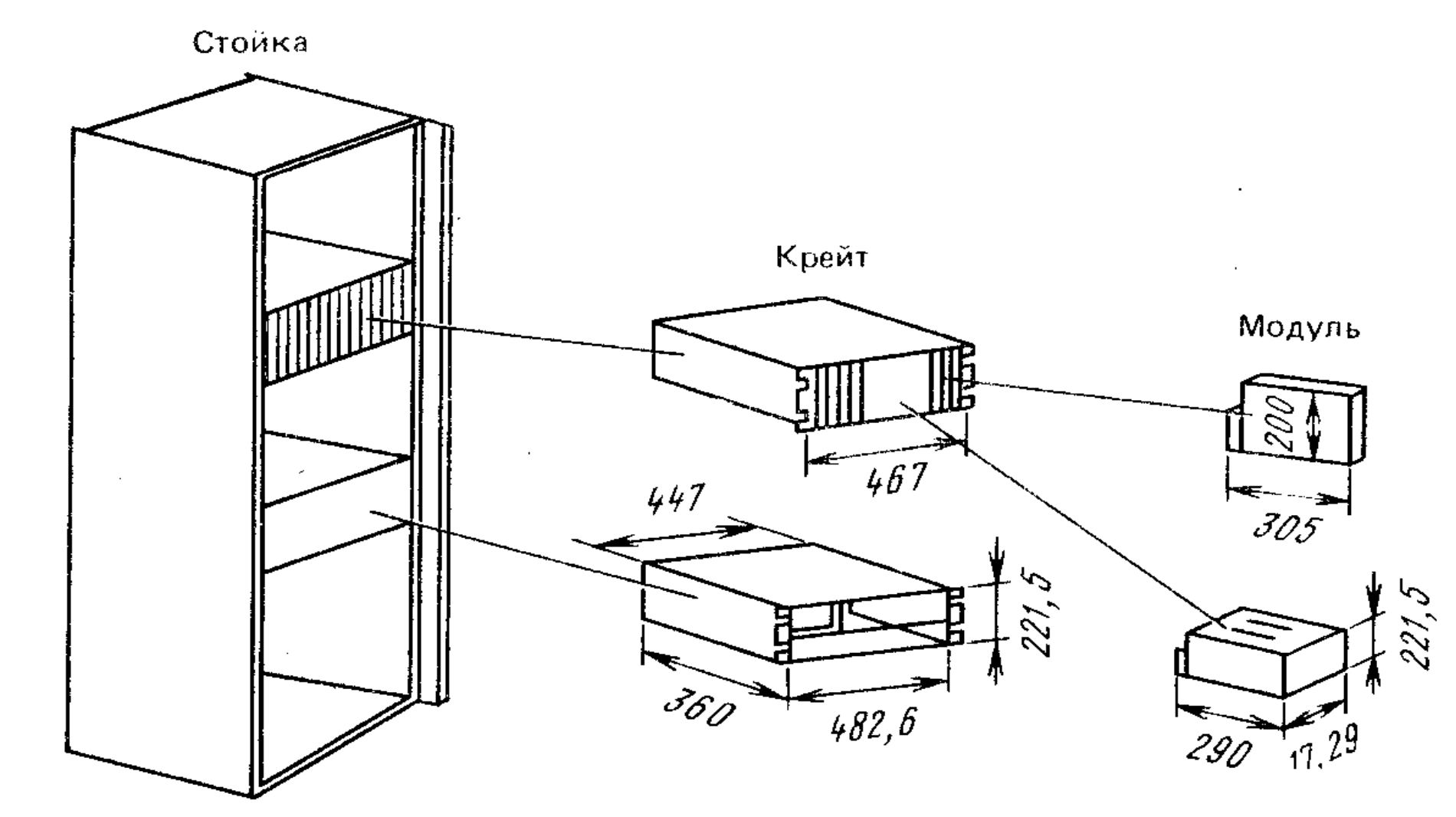
Особенности системы КАМАК:

- модульный принцип построения;
- конструктивная однородность (унификация несущих конструкций и модулей;
- магистральная структура интерфейса;
- программное управление измерительной системой.



Структура измерительной системы на основе КАМАК (модули - крейт - ЭВМ (компьютер)

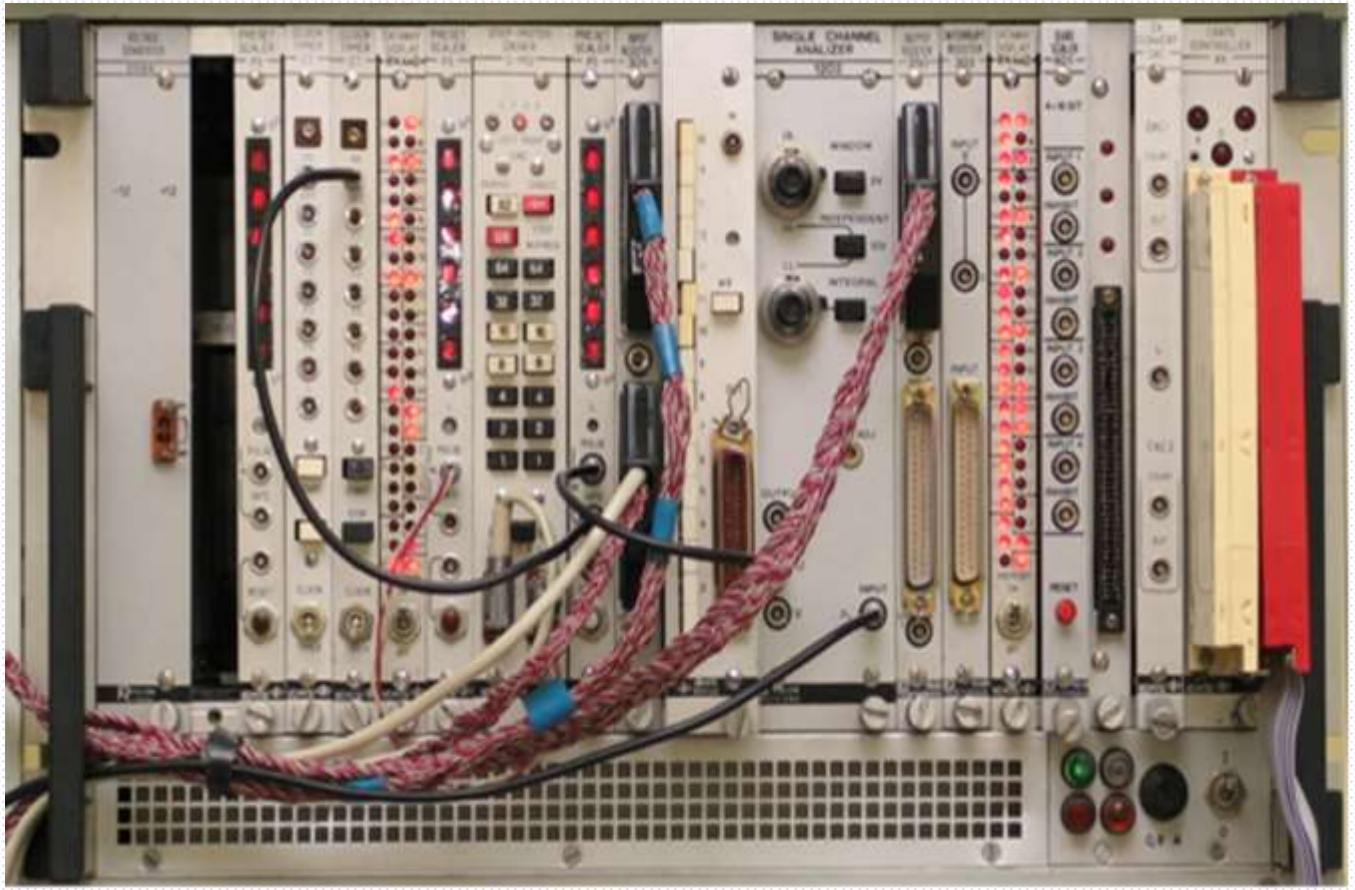
- Основой структуры КАМАК является ***крейт*** –корзина, в которую вставляют платы-модули.
- Для модулей в крейте имеется 25 гнезд с верхней и нижней направляющими.
- Место 24 и 25 в крейте занимает контроллер.



- Платы модулей входят в двухрядные 86-контактные разъемы на задней плате крейта. Минимальная глубина крейта - 360 мм.
- Крейт может быть снабжен собственными источниками питания, а может питаться от общей сети. Предусмотрено 14 линий питания (6 – основных и 8 – дополнительных, включая 1 линию сигнальной земли), есть 2 свободных резервных линии. Максимальная мощность рассеивания в крейте - 200 Вт. Охлаждение воздушное.
- Основной функциональный элемент системы КАМАК - ***модуль***. Для обеспечения сопряжения модулей стандартом КАМАК регламентирован ряд условий функционирования модулей, электрической и конструктивной совместимости. Существует более 20 типов унифицированных модулей КАМАК (АЦП, ЦАП, усилитель, мультиплексор и др.), которые выпускаются разными фирмами.

- Интерфейс крейта имеет разные шины для данных и сигналов управления.
- Организация системы шин радиально – магистральная, обмен информацией – параллельный, метод обмена – синхронный, допускается работа с любой ЭВМ (компьютером).
- Обмен информацией между модулями и контроллером происходит по магистрали крейта. Содержит 82 магистральные линии сигналов и 2 индивидуальных (радиальных) линии, идущих от контроллера крейта к каждому модулю. Имеет 7 шин: адреса, операций, состояний, синхронизации, данных, управления и нестандартных соединений.
- Предельная пропускная способность магистрали КАМАК — 3 мегабайта/с. Электрические сигналы на шине КАМАК соответствуют отрицательной TTL логике.
- Интерфейс КАМАК имеет централизованное управление в системе одного крейта от контроллера крейта.
- Если одного крейта с 23 модулями недостаточно для автоматизации большого эксперимента – вводят второй уровень централизации управления обменом информации - ветвь (Grauch) или вертикальная магистраль.

- Ветвь может объединять до 7 крейтов., которые обычно располагаются в одной стойке. Организация связи между крейтами может иметь разную структуру - радиальную, магистральную и радиально-магистральную.
- Связь с компьютером идет через один из контроллеров.
- . Передача информации по магистрали крейта идет 24 битовыми словами со скоростью до 25 Мбит/с. Скорость связи между крейтами - до 10 Мбит/с.



Вид передней панели крейта КАМАК

Достоинства CAMAK:

- высокая степень унификации (на международном уровне),
- большая скорость передачи информации,
- простота реализации новых систем,
- высокая точность (большое слово данных).

Недостатки:

- громоздкость (особенно для многоканальных измерений),
- в производственных условиях применение ограничено слабой конструкцией разъемов, стоек, крейтов и направляющих модулей
- сложное программирование (обычно на Ассемблере, Бейсике и на языке программирования IML (Intermediate Language)
- трудность сопряжения 24-битного слова с 16- и 32- разрядными ссистемами компьютеров
- плохая совместимость с другими интерфейсами

Измерительные системы на основе стандарта LXI (Ethernet)

В 2004 году консорциум ведущих мировых производителей и пользователей контрольно-измерительного оборудования (LXI Consortium) объявил о завершении разработки нового стандарта измерительных систем, названного LXI (LAN eXtensions for Instrumentation – расширение LAN для измерений). Основной целью разработки нового стандарта было увеличение скорости работы измерительных систем, уменьшение их стоимости, размеров и времени, затрачиваемого на настройку ИС.

Стандарт LXI основан на технологии Ethernet (IEEE 802.3) , используемой для компьютерных сетей (LAN). **Достоинства** таких сетей:

- Большой срок существования (дольше, чем другие компьютерные интерфейсы);
- Широкая распространенность LAN во всем мире;
- Отсутствие принципиальных ограничений на расстояние и число модулей;
- Высокая скорость передачи данных;
- Низкая стоимость реализации и эксплуатации;
- Открытая документация на сетевые протоколы;
- Легкость перехода на оптоволокно, беспроводные каналы и пр.
- Возможность использовать готовые аппаратные и программные средства и получить для разработчиков эффективное решение проблем измерительных систем.

Что такое требования Ethernet стандарта LXI?

- Все приборы LXI должны использовать стандартный интерфейс IEEE 802.3 Ethernet (разъем RJ-45) и протокол TCP/IP версии IPv4 как минимум
- Поддерживать сообщения IP (internet protocol) TCP (transmission control protocol) и UDP.
- Используется автообщение, поэтому устройства в сети работают по умолчанию на общей скорости.

Использование преимуществ Ethernet, сетевых возможностей Internet, стандартных протоколов LAN дает возможность в измерительных системах перейти на более высокие скорости ввода/вывода, избавиться от крейтов и дорогих интерфейсных кабелей. В составе измерительной систем LXI могут быть использованы традиционные измерительные настольные приборы и специализированные измерительные модули с интерфейсами LXI, подключенные по LAN к выходным портам коммутатора/маршрутизатора Ethernet.

Стандарт LXI рассматривает два режима связи с приборами LXI:

- программный, с применением специальных драйверов
- интерактивный - с использованием стандартного Web-браузера.

В *программном* режиме приборы LXI должны поддерживать драйверы по спецификации IVI (Interchangeable Virtual Instrument) - это спецификации для программирования виртуальных измерительных приборов.

В *интерактивном* режиме приборы LXI должны по запросу выдавать Web-страницу, которую можно просматривать любым стандартным Web-браузером. Эта страница должна содержать следующую информацию: • номер модели прибора, данные о производителе; серийный номер прибора и его краткое описание; LXI-класс прибора (A, B или C), версию стандарта LXI;

- имя хост-компьютера, MAC-адрес и IP-адрес прибора.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!









МИНОБРНАУКИ РОССИИ

«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ” им. В. И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ)

Факультет радиотехники и телекоммуникаций,
Кафедра Теоретических основ радиотехники

http://kepstr.eltech.ru/tor/ptri

А.А. Данилин

«Приборы и техника радиоизмерений»
(электронный конспект лекций)

Приборный интерфейс GPIB

Санкт-Петербург
2024 г.

*Приборный **интерфейс GPIB (КОП)***

- Интерфейс, предложенный фирмой Hewlett-Packard (HP) в 1965 г. (Hewlett-Packard Interface Bus (***HP-IB***)). Назначение - связь программируемой контрольно-измерительной аппаратуры HP с компьютерами.
- В HP-IB были заложены следующие свойства:
  - относительно высокая скорость передачи
  - значительное число приборов на шине
  - гибкость топологии системы;
  - умеренная длина линий между приборами.
- Интерфейс получил большее распространение ввиду его полной открытости и документированности.

- В **1975** году переименован в ***GPIB*** (General Purpose Interface Bus) и одобрен Институтом инженеров по электротехнике и электронике как стандарт IEEE 488-1975 [***IEEE-488.1***].
- В **1987** году стал стандартом ANSI/IEEE 488.1 и был расширен в области программного обеспечения до версии ***488.2***. Этот стандарт зафиксировал электрические и механические соединения между компьютерами и приборами.
- Интерфейс GPIB рекомендован к использованию Международной электротехнической комиссией МЭК 625.1 (International Electrotechnical Commission ***IEC 625.1***).
- Аналогичный российский стандарт ***ГОСТ 26.003-80*** использует название «канал общего пользования» (***КОП***).

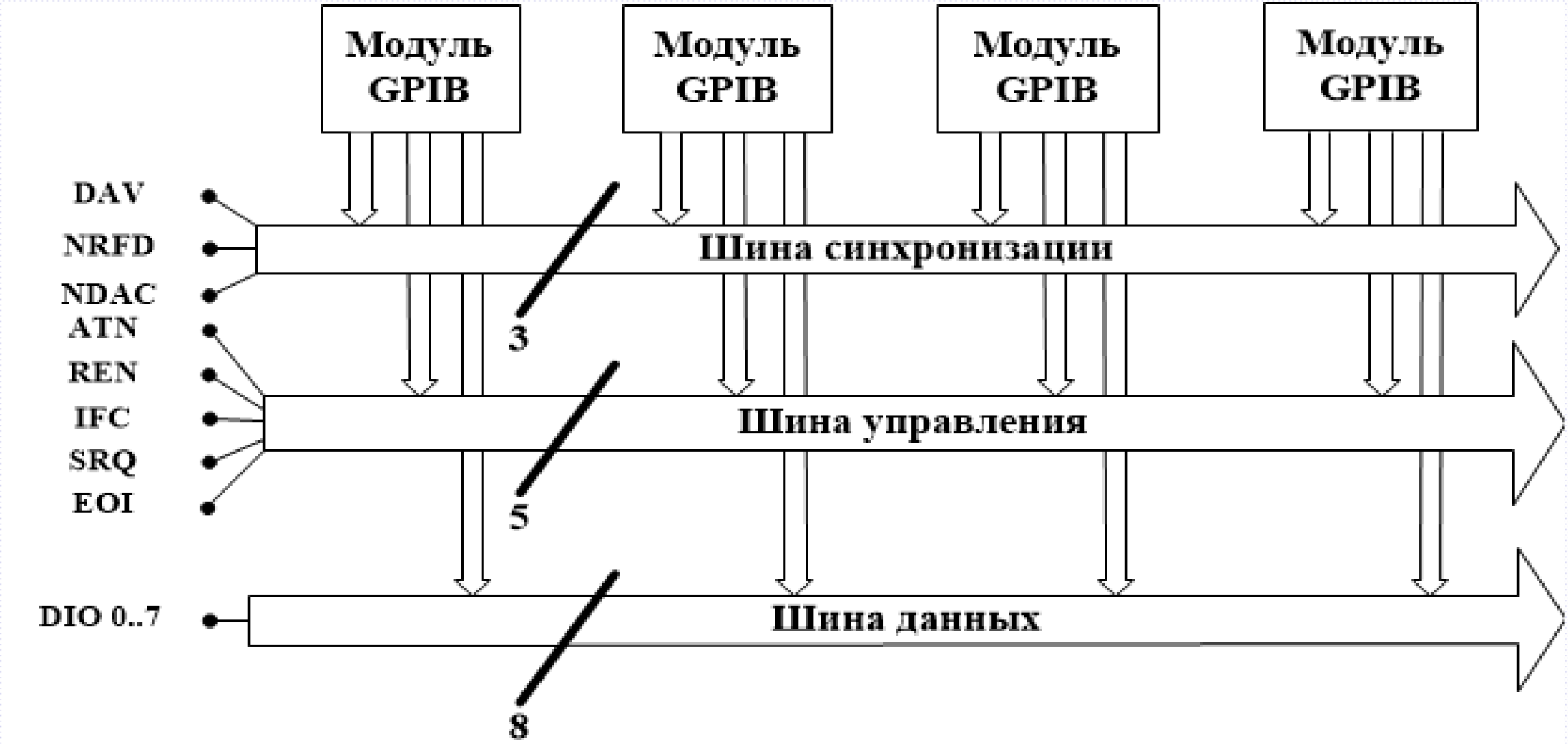
Принципы работы интерфейса GPIB:

- Приборно-модульный принцип агрегатирования;
- Многопроводный магистральный канал передачи измерительной и управляющей информации:
- Сравнительно высокая скорость передачи (до 1 Мбайт/с);
- Параллельный обмен байтами;
- Магистральный принцип построения ИС;
- Простота конструкции и легкость сборки системы;
- Умеренные требования по дальности передачи (единицы метров);
- Лабораторные условия применения;
- Использование преимущественно в составе ИВК.

Основные технические характеристики интерфейса GPIB:

- общая суммарная длина интерфейсной линии связи - до 20м;
- число подключаемых модулей, определяемое нагрузочной способностью шины (без расширителей шины) - не более 15;
- общее число приемников и источников не более 31 (при однобайтовой адресации);
- максимальная скорость передачи не более 1Мбайт/сек, реальные скорости составляют порядка 250...500 Кбайт/сек.

Длина кабелей– не более 4 метров (практически 2-3 м) при общей длине магистрали до 20 м. На больших расстояниях– расширители магистрали (например, HP 37204 A,B) и соединение удаленных сегментов ИС по последовательному интерфейсу



Магистраль GPIB разбита на три шины: 8 линий входят в **шину данных**, 3 линии – в **шину синхронизации** и 5 линий – в **шину управления** интерфейсом .

Шина данных (***Data Lines***) имеет 8 линий (DI0-DI7) и предназначена для передачи байта информации (данные и команды интерфейса). Передача информации идет последовательно *побайтно* в асинхронном режиме.

Шина управления (***Bus Control Lines***) содержит 5 линий управляющих сигналов (ATN, IFC,SRQ,REN,EOI).

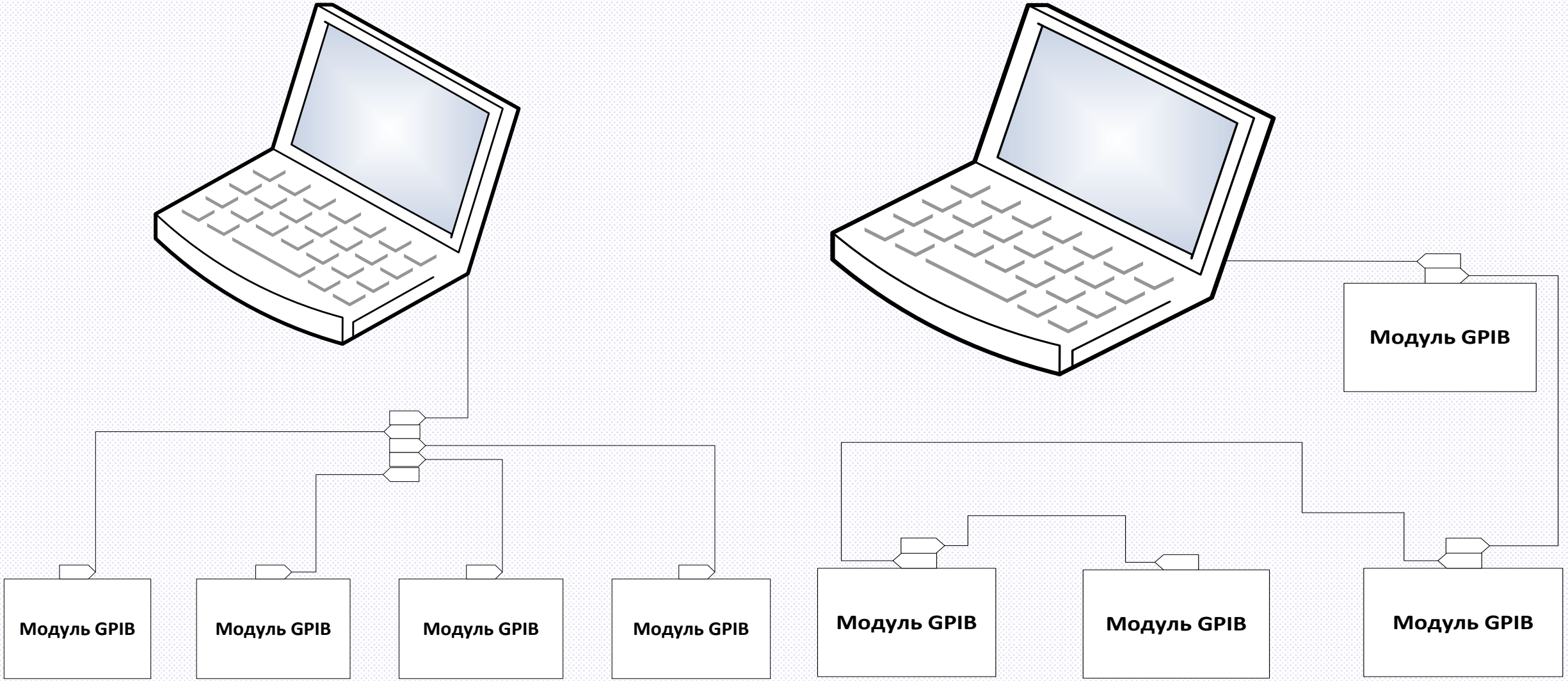
Шина синхронизации (***Handshake Lines***) содержит 3 линии (DAV, NRFD, NDAC), используемых для квитирования передачи байта информации.

Линии шины управления интерфейса:

- **ATN** – Attention , (УП - управление) применяется для кодирования типа передаваемой информации. Контроллер устанавливает линию ATN в логическую 1 при посылке команд, и в логический 0, когда источник посылает данные.
- **IFC** – Interface Clear (ОИ – очистка интерфейса) используется системным контроллером для инициализации или реинициализации шины. При этом производится установка всех интерфейсных карт в исходное состояние.
- **REN** –Remote Enable (ВУ –дистанционное управление) переводит приборы, подключенные к шине, в режим выполнения команд с шины (а не с передней панели прибора) и обратно.

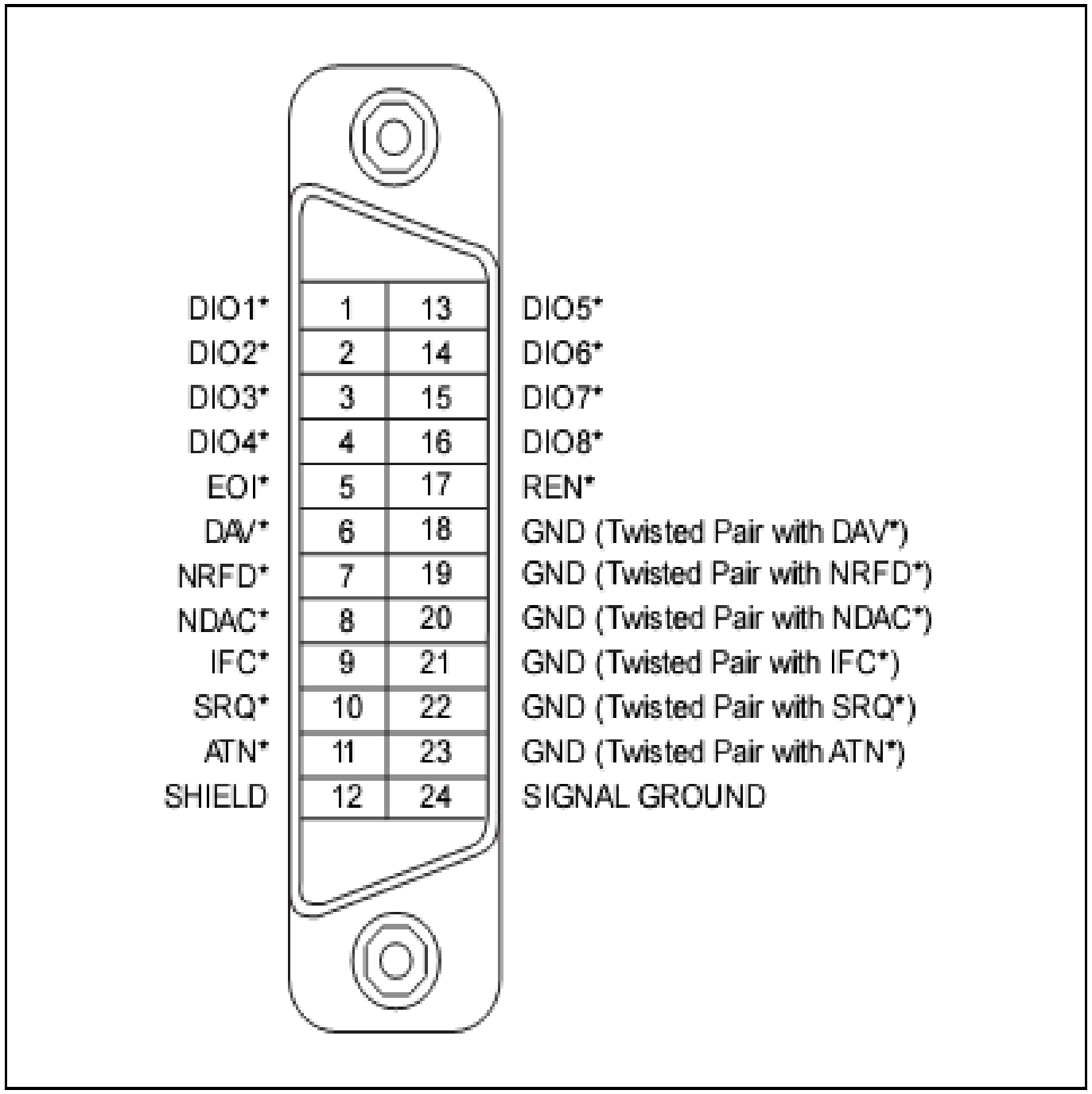
  SRQ – Service Request (ЗО – запрос на обслуживание) используется в реализации функции SR. Любой прибор может установить линию SRQ для асинхронного запроса на обслуживание контроллером.
- **EOI** – End of Identify (КП –конец передачи) – использует источник для указания на последний байт сложного сообщения.

Измерительная система GPIB создается соединением приборов и компьютера (контроллера) интерфейсными кабелями. Физическая топология магистрали может быть радиальной (звезда) или последовательной (каскадной). Однако GPIB представляет собой магистраль.



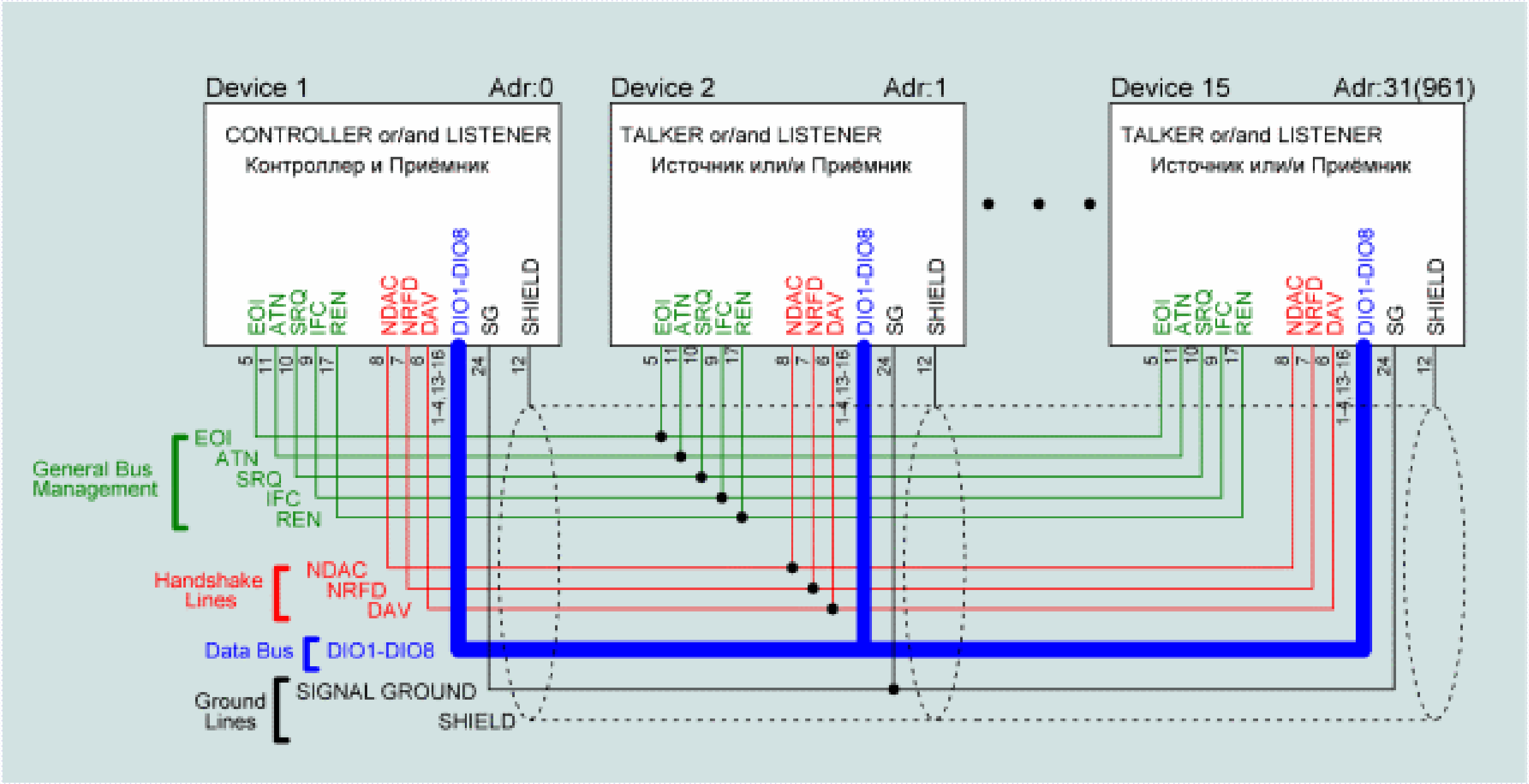


Разъем стандартного кабеля GPIB. Используются разъемы РПМ7-24 (два разъема – розетка и вилка - на одном конце линии).

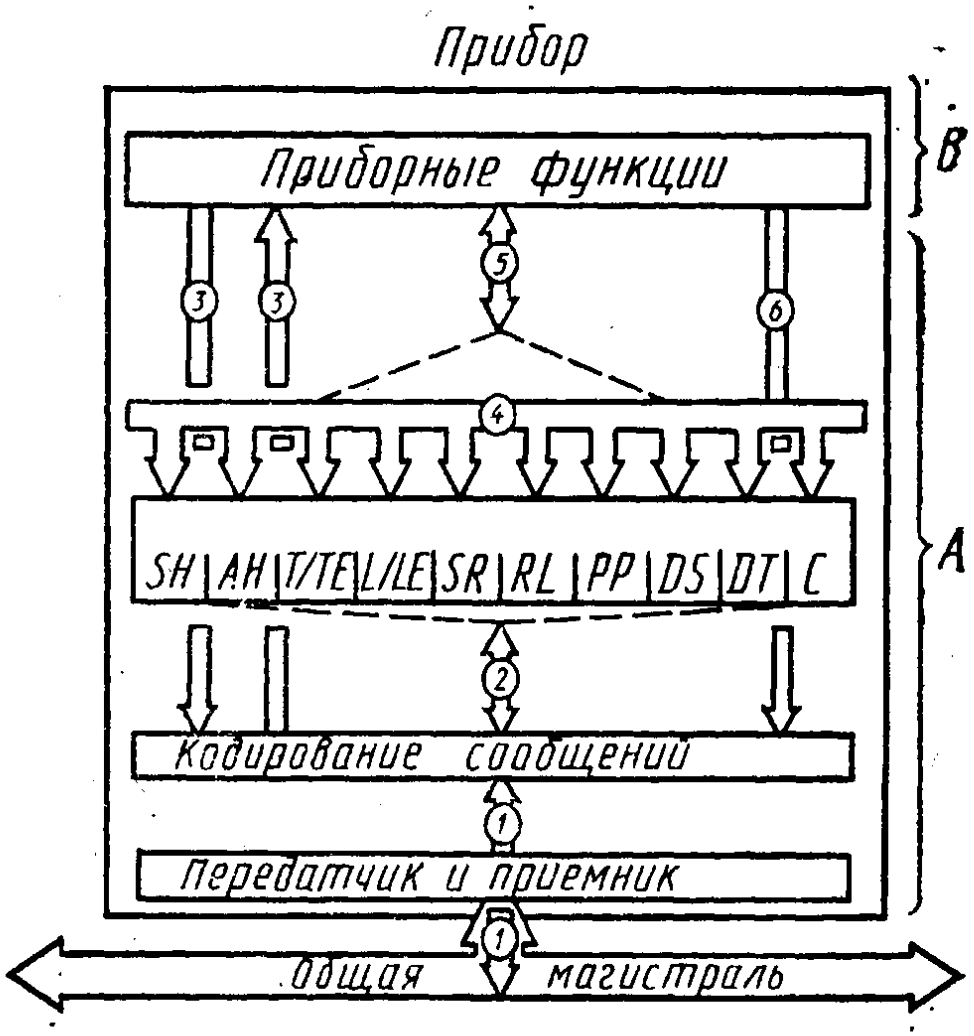


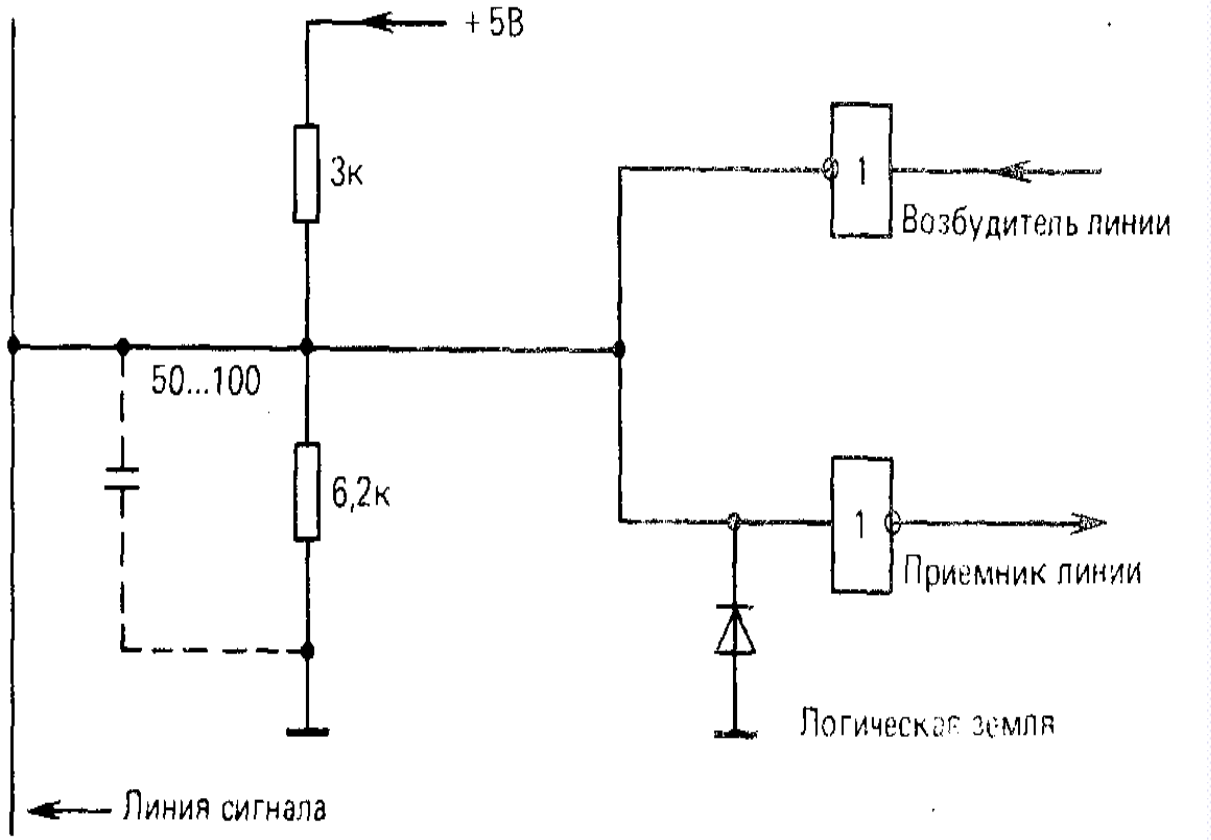
GPIB-кабель состоит из 16 сигнальных линий и 8 линий заземления. Сигналы на линиях имеют ***отрицательную*** TTL логику (нулю соответствует напряжение > 2.5 В, единице - <0.8 В).

Измерительная система с интерфейсом GPIB



В **аппаратную часть** интерфейса входят аппаратно-программные блоки, расположенные в модулях (приборах, компьютере) – ***интерфейсные карты (ИКАР).***





Непосредственно с линиями магистрали соединены **входные цепи приемопередатчиков ИКАР.**

- Цифровые схемы ***кодирования*** и ***декодирования*** сигналов преобразуют цифровые сигналы магистрали во внутренние коды ИКАР и наоборот.
- ***Интерфейсной функцией*** называют совокупность операций при обмене данными (алгоритмы передачи и приема данных, управления и пр.). Они реализуют работу интерфейса в различных режимах. Интерфейсные функции стандартизованы. Для конкретного прибора, в зависимости от его назначения, фирма-изготовитель предусматривает набор необходимых интерфейсных функций.
- ***Приборные функции*** – алгоритмы реализации основных измерительных операций в конкретном приборе. Это программы работы каждого конкретного прибора по приему, передаче информации и выполнению команд, поступивших по интерфейсу (например, масштабирование данных, запуск прибора на измерение и пр.).

Реализация интерфейсных функций осуществляется как с использованием ***сигналов шин управления и синхронизации***, так и путем передачи ***команд*** по шине данных

Стандарт GPIB определяет три различных типа устройств, которые могут быть подключены к шине:

- ***"listener"*** (слушатель,приемник);
- **"talker"** (передатчик,источник) ;
- ***контроллер***.

- Устройства, подключенные к системе, могут менять свое состояние ("listener" либо "talker") по командам контроллера («**арбитра шины**»).
- Устройство в состоянии "listener" считывает сообщения с шины;
- Устройство в состоянии "talker" посылает сообщения на шину.
- В каждый момент времени в состоянии "talker" может быть одно устройство. В состоянии "listener" может быть произвольное количество устройств.

Интерфейсные функции

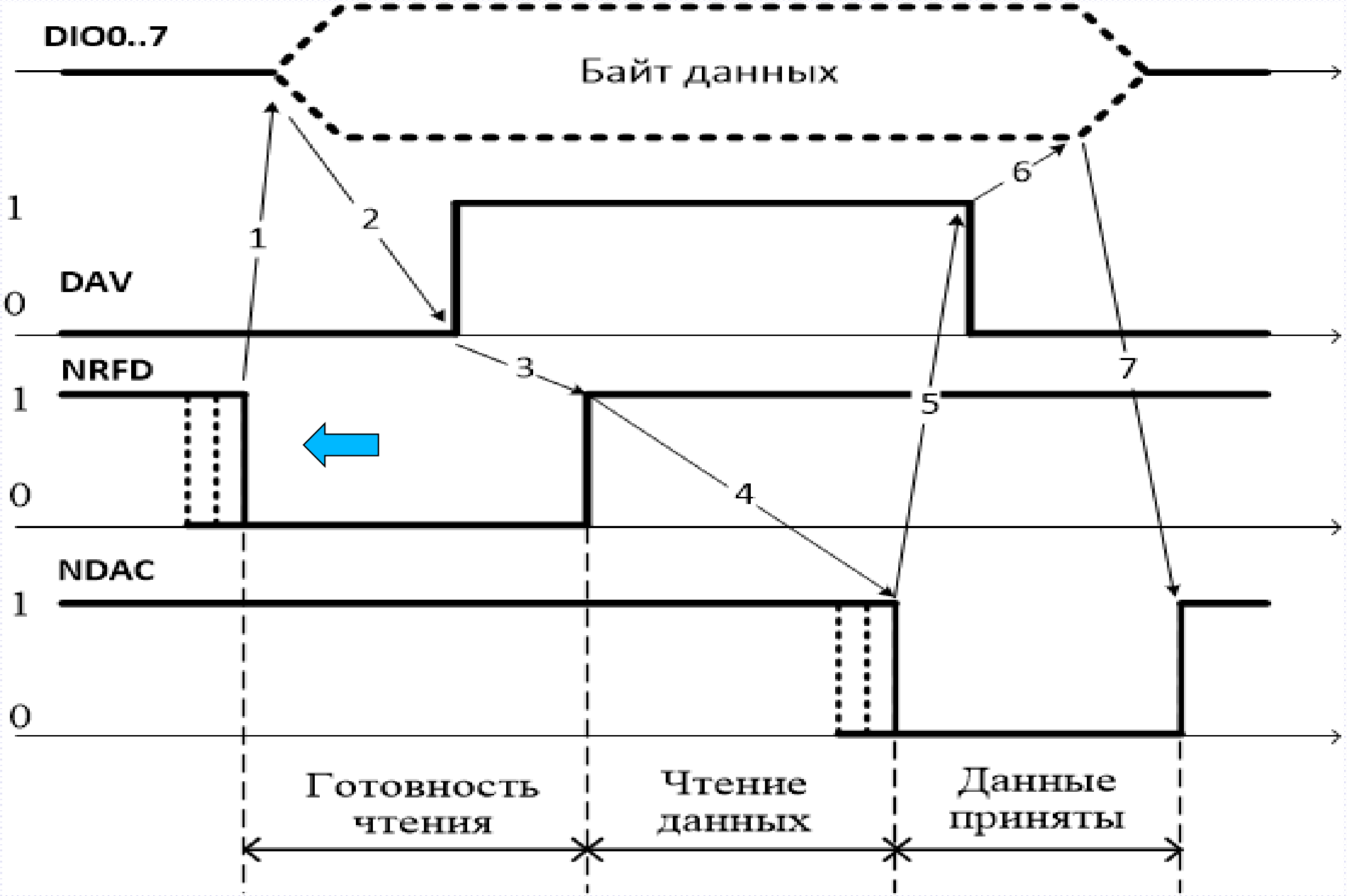
- **SH** (Source Handshake) – функция согласования источника. Обеспечивает правильную передачу байта от источника данных;
- **AH** (Acceptor Handshake) – функция согласования приемника (обеспечивает правильный прием байта данных);
- **T,TE** (Talker) – функция передачи данных;
- **L,LE** (Listner) – функция приема данных;
- **SR** (Service Request) – асинхронный запрос на обслуживание от контроллера;
- **RL** (Remote/Local) – блокирование ручного управления прибором и/или управление по интерфейсу;
- **DC** (Device Clear) –установка (сброс) прибора в исходное состояние;
- **DT** (Device Triggered) – запуск прибора и реализация измерительной функции (например, начало измерений);
- **C** (Controller) – функция контроллера – адресация источников и приемников, инициализация и управление магистраль

Назначение линий шины синхронизации:

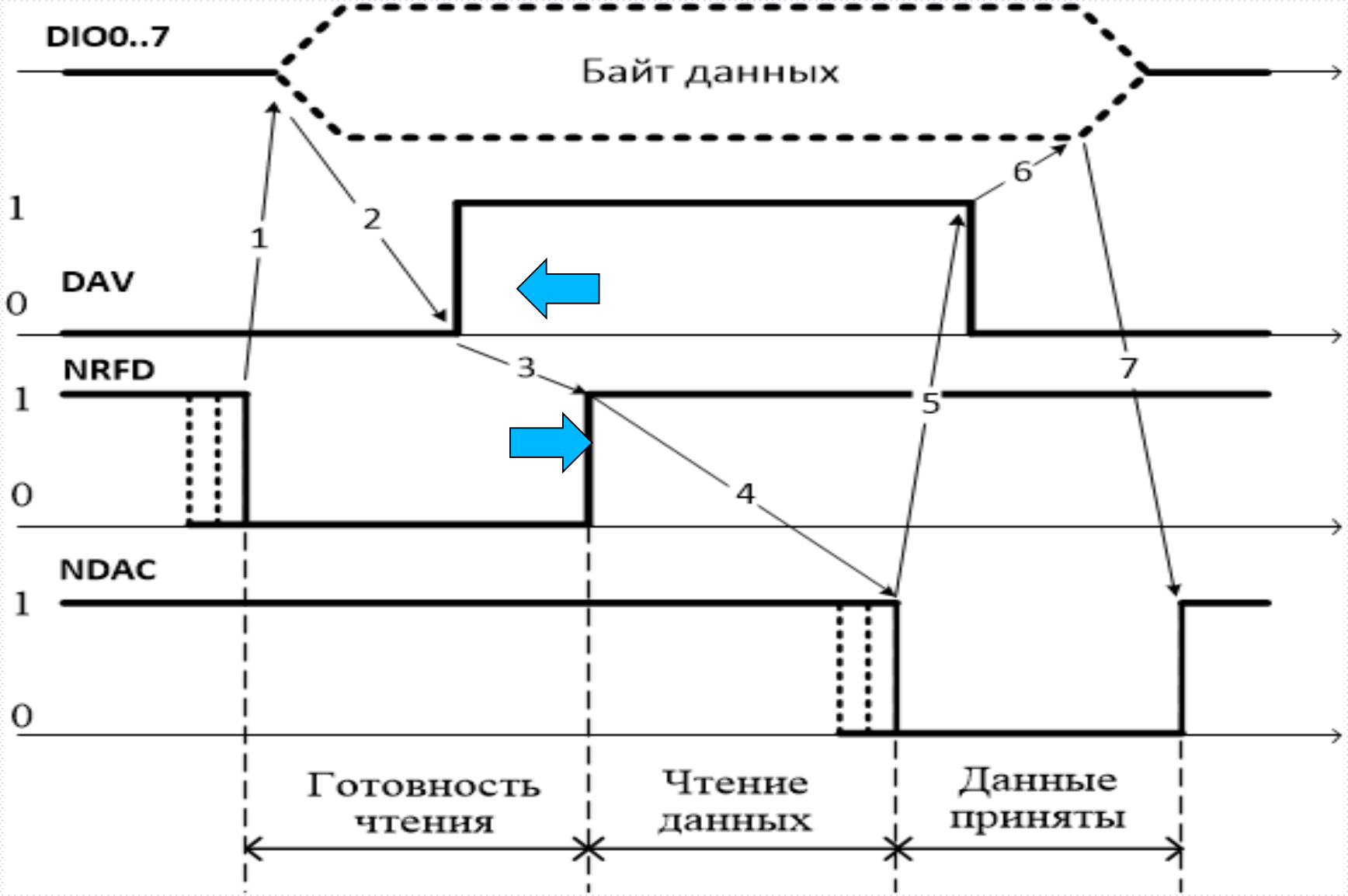
- **DAV** – Data Valid (СД –сопровождение данных)- выдается передатчиком при передаче данных;
- **NRFD** – Not Ready for Data (ГП –готовность к приему) выдается приемником при его неготовности;
- **NDAC** - Not Data Accepted (ДП – данные приняты) – устанавливается приемником при отсутствии приема данных.

Эти сигналы используются при передаче и приеме байта по шине данных (интерфейсные функции SH,AH в составе функций L,T)

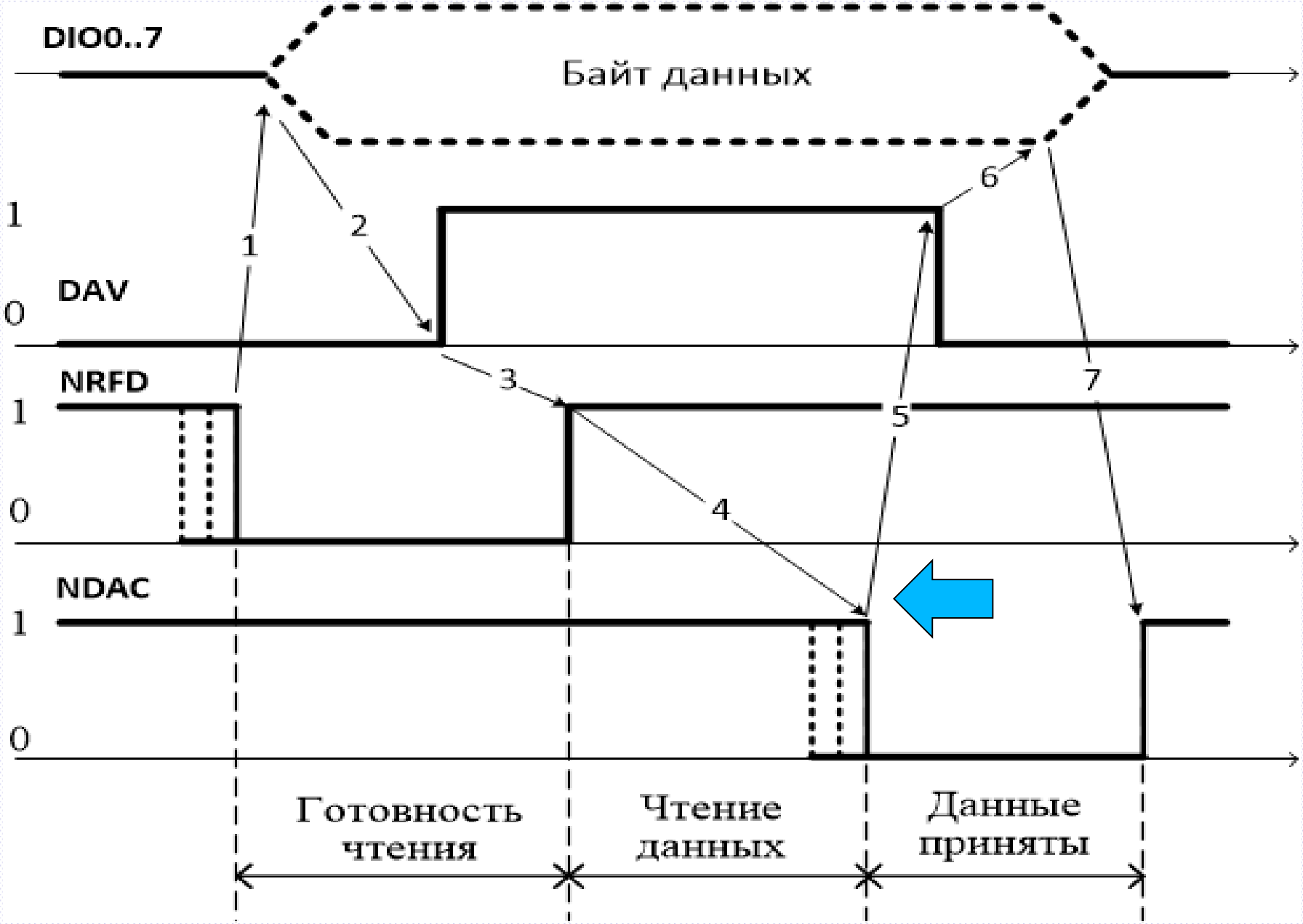
Исходное положение при передаче данных –приемники выставляют нулевой сигнал NRFD .



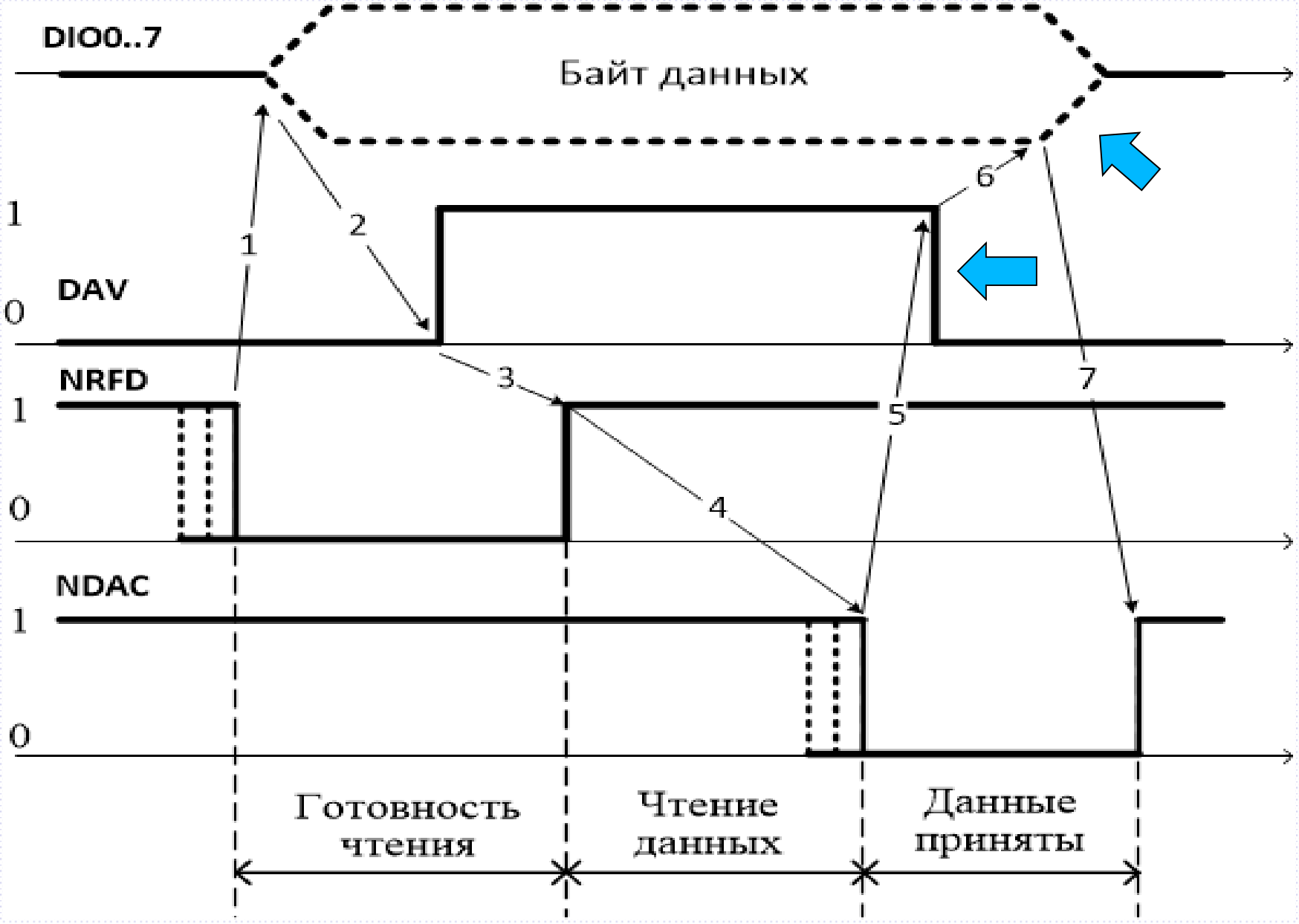
Передатчик устанавливает байт на шине данных и подтверждает его достоверность сигналом DAV=1 (2). Некоторое время идет процесс приема данных, приемник устанавливает при этом сигнал неготовности 3 к новому приему.



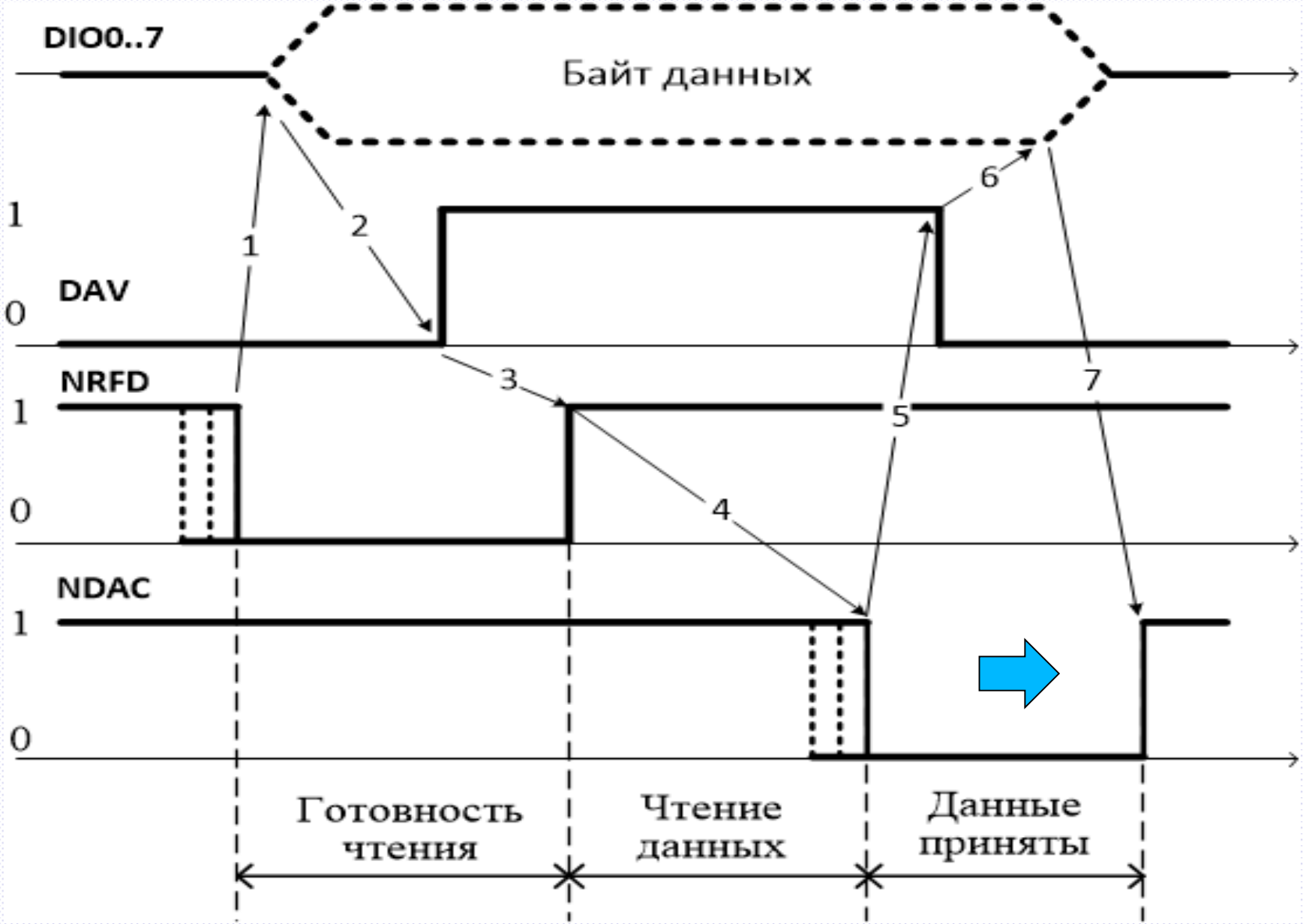
Конец приема подтверждается (квитируется) установкой сигнала NDAC=0 (4).



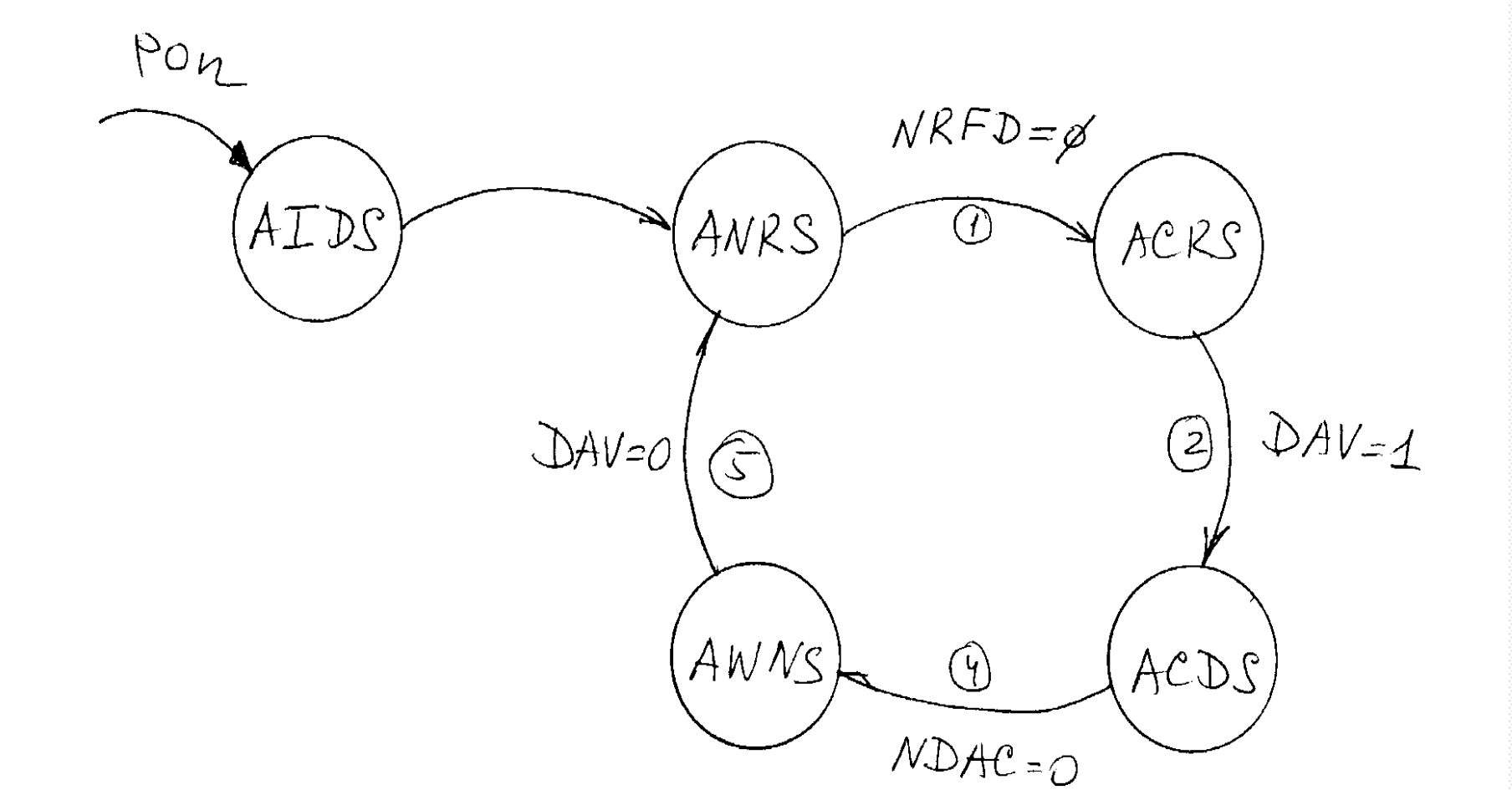
После получения этого сигнала от всех приемников передатчик сбрасывает сигнал достоверности данных DAV = 0 (5) и снимает байт данных (6).



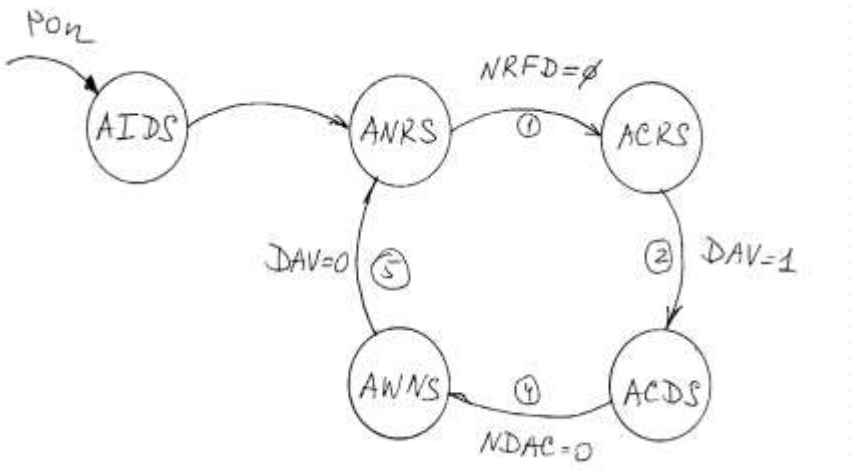
Приемник восстанавливает сигнал NDAC=1 (7). Система приходит в исходное состояние и процесс повторяется



В стандарте интерфейса принято функции описывать графами состояний



Граф состояний интерфейса шины для функции АН.



Исходное состояние по включению питания – AIDS (Acceptor Idle State). Если контроллер установил для одного или нескольких устройств режим приемника, то для него исходным состоянием будет ANRS (Acceptor Not Ready State).

При сигнале готовности к приему NRFD=0 интерфейс переходит в состояние ACRS (Acceptor Ready State) и при передаче байта возникает состояние ACDS (Acceptor Data State) .

После приема байта система переходит в состояние ожидания AWDS (Acceptor Wait State), а после сброса байта – в исходное состояние.

Процесс перехода повторяется при приеме каждого байта. Аналогичными графами состояний описываются все функции интерфейса.

Управление передачей осуществляет ***контроллер*** (реализующий интерфейсную функцию С). В качестве контроллера может выступать отдельный модуль системы, компьютер или выделенный для этой цели прибор. Функция С может передаваться от модуля к модулю. В этом случае один из контроллеров является ответственным контроллером (Controller-in-Charge, CIC).

Операция распределения ролей модулей в измерительной системе называется ***адресацией модулей*** (приборов). В одно и то же время может быть адресован один передатчик и несколько приемников. Каждый прибор в системе имеет свой уникальный номер, вводимый вручную. Адресное пространство интерфейса от 0 до 30 (всего 31). Адресация производится путем передачи по шине данных ***адресной команды интерфейса***

Код команды адресации содержит номер адресуемого прибора.

- **MLA** (My Listner Adress) Команда адресации №-го приемника имеет шестнадцатеричный код 20h+№ прибора (32+№).
- **MTA** (My Talker Adress) Команда адресации №-го передатчика имеет шестнадцатеричный код 40h+№ прибора (64+№).

Другие наиболее важные команды интерфейса:

- **UNL,UNT** – разадресация приемников и передатчиков;
- **GET** - Запуск предварительно адресованного на прием прибора;
- **SDS** - Сброс адресованного прибора;
- **GTL** – переход прибора на местное управление.

Общие для всех приборов команды:

- **DCL** - Сброс всех приборов;
- **LLO** - Запирание местного управления
- **SPE,SPD** - Команды режима последовательного опроса;
- **PPE,PPD** - Команды режима параллельного опроса.

Аппаратными командами интерфейса являются сигналы, передаваемые по линиям управления:

- **REN** - сброс и установка дистанционного управления приборами,
- **IFC** - очистка интерфейса, то есть перевод его в исходное состояние

Информация (сообщение), передаваемая по шине данных:

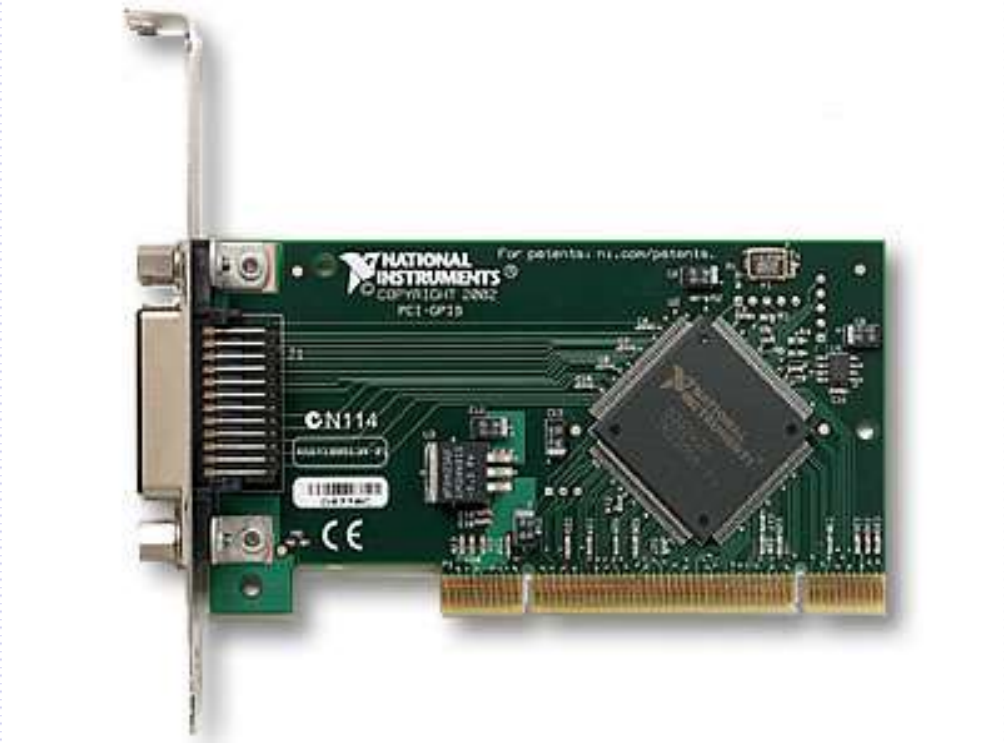
- *Сообщение* - последовательность информационных байтов на шине данных, завершаемых ограничителем - кодом **0Ah (LF (**ПС**))**.
- По стандарту данные передаются в тестовом формате (ASCII-коды символов, цифр и букв). Внутри сообщения допускаются **разделители** (знаки запятой и точки с запятой).
- Завершение серии сообщений - сигнал шины управления **EOI (КП),** устанавливаемый передатчиком одновременно с последним байтом сообщения.

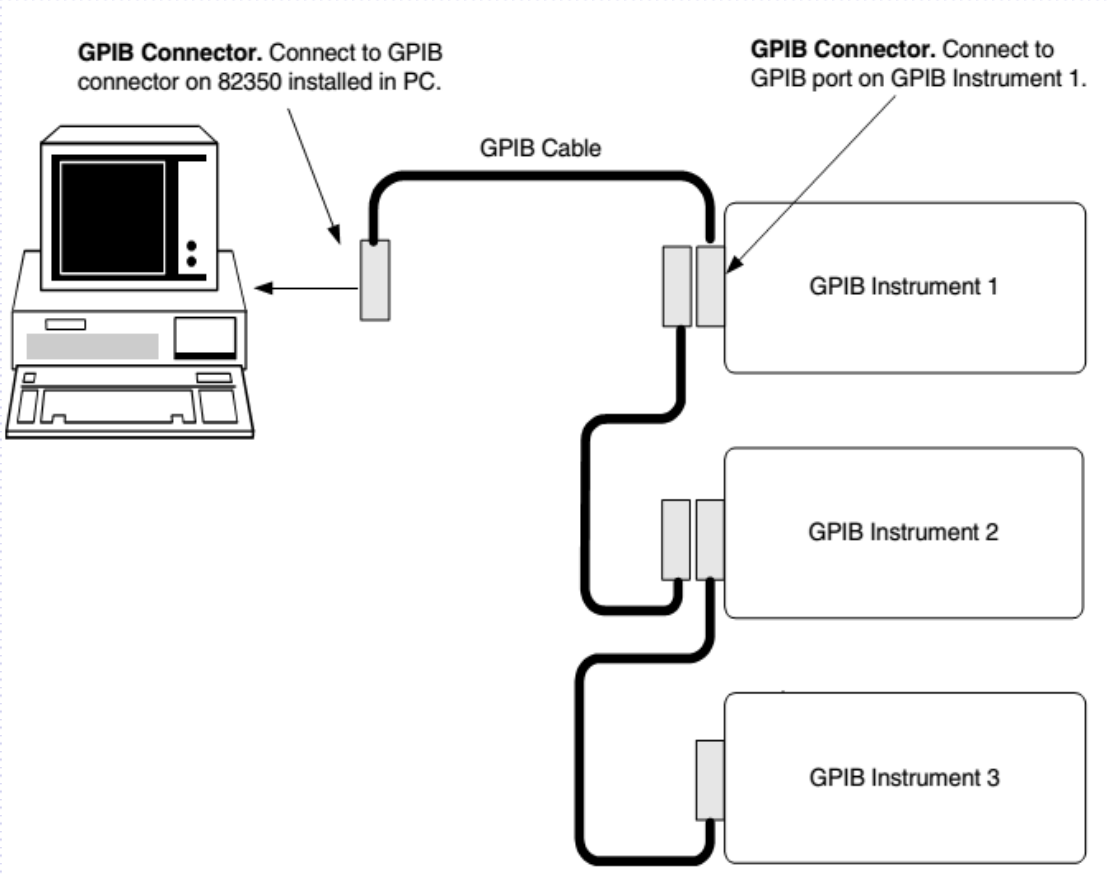
Стандартный режим обмена информацией предполагает полное подчинение приборов контроллеру. Управление идет в направлении «Контроллер ->Прибор». Обратная связь отсутствует. Передачу информации в направлении «Прибор =>Контроллер» обеспечивает интерфейсная функция ***SR (Service Request) - запрос на обслуживание.***

Функция SR (запрос на обслуживание)

- Прибор получает доступ к контроллеру, выставляя на линии **SRQ** единичный сигнал. Реакция контроллера - обработка ситуации запроса:
- Контроллер приостанавливает текущие действия и переводит интерфейс в режим последовательного опроса **SP** (контроллер подает команду **SPE**). По этой команде все приборы приостанавливают работу;
- Контроллер последовательно назначает передатчиками все приборы. В этом режиме они выдают не данные, а специальный байт состояния - **STB (БТС**). Формат байта позволяет закодировать информацию о состоянии прибора. Так, шестой бит равен 1, если прибор выставлял SRQ, иначе он равен нулю. Бит 4 используют для передачи от прибора сигнала "Занят/Готов", бит 5 показывает состояние прибора "Ненормальное/Нормальное".
- Контроллер сбрасывает сигнал SRQ и, последовательно опрашивая все приборы, выясняет, какой из них требует обслуживания и в каком состоянии находится прибор.
- Завершение режима последовательного опроса осуществляется сигналом **SPD**.

Контроллеры интерфейса GPIB бывают трех видов – ручные (выполненные в виде пульта управления), специализированные (платы и модули, встраиваемые в прибор или подключаемые извне) и программируемые. **Программируемые контроллеры** выполняют в виде микроЭВМ и на базе компьютеров. Последнее решение наиболее распространено - многие фирмы выпускают платы контроллеров GPIB.





Плата сопряжения интерфейса GPIB с персональным компьютером по шине PCI

General **P**urpose **I**nterface **B**us (GPIB)







(IEEE-488 is a short-range digital communications bus specification)

8 data lines, 3 Handshaking lines, 5 Interface management lines

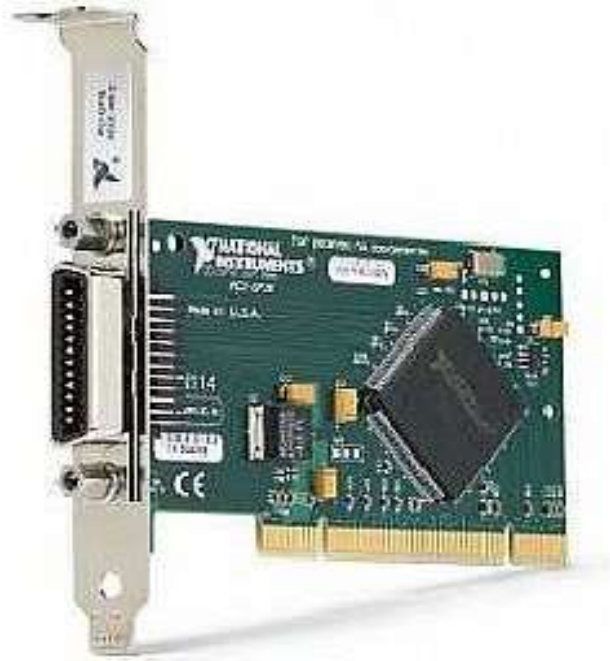
HS488 can transfer up to 8 Mbytes/s (2 m cable)



GPIB-USB



GPIB-RS232



GPIB-PCI

82350B technical specifications	
General requirements	
Minimum system requirements	Refer to page 4 for requirements in using the Keysight IO Libraries software (included with the instrument control hardware)
PCI bus slot	5-V PCI slot, 32 bits
Supported standards	IEEE 488.1 and IEEE 488.2 compatible, PCI rev 2.1
General characteristics	
Power	Backplane +5 V PCI
Connectors	– Standard 24-pin IEEE-488 (GPIB) – +5 V PCI
Maximum data rate	900 KB/s
Maximum instrument connection	14 instruments—daisy chain via GPIB
Buffering	Built-in
Configuration	Plug-and-play
EMC and safety	– IEC 61326-1: Group 1, Class A – IEC 61010-1
Dimensions	
Length, width, and height	122 mm (L) x 122 mm (W) x 22 mm (H) (a full-height PCI card)
Weight	0.091 kg
Environmental specifications	
Operating environment	0 °C to 55 °C
Operating humidity	Up to 90% at 40 °C non-condensing
Storage environment	–40 °C to 70 °C
Storage humidity	Up to 90% at 65 °C non-condensing
Ordering information	
Includes	Keysight IO Libraries Suite and VISA/SICL programming manuals on CD-ROM
Accessories	GPIB cables/adapter (see page 12)



Внешний контроллер Agilent 82357A, предназначенный для работы с ноутбуками и планшетами через универсальную последовательную шину USB.



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!









МИНОБРНАУКИ РОССИИ

«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ” им. В. И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ)

Факультет радиотехники и телекоммуникаций,
Кафедра Теоретических основ радиотехники

http://kepstr.eltech.ru/tor/ptri

А.А. Данилин

«Приборы и техника радиоизмерений»
(электронный конспект лекций)

Логические анализаторы

Санкт-Петербург
2025 г.

Логические анализаторы и осциллографы смешанных сигналов

Недостатки цифровых осциллографов при исследованиии цифровых систем связи, интерфейсов измерительных и микропроцессорных систем:

- Необходимо одновременно наблюдать и сравнивать между собой большое количество процессов (до 64 и более). Осциллографы обычно позволяют наблюдать не более 4 сигналов одновременно.
- Цифровые сигналы часто бывают непериодическими, что затрудняет синхронизацию и запуск осциллографа.
- Исследование формы цифрового сигнала и измерение его уровня и длительности часто оказывается излишним. Достаточно фиксировать уровень сигнала в определенные моменты времени, задаваемые сигналом тактовой частоты (контроль на «логическом» уровне).

Поэтому для тестирования цифровых устройств более подходят специализированные средства измерения, называемые **логическими анализаторами** (*Logic Analyzers*).
Осциллографы применяют для измерения параметров цифровых сигналов на *«физическом»* уровне (определение длительности фронта, величины джиттера, получение глазковой диаграммы и пр.).

Логический анализатор (ЛА) – это специализированный многоканальный прибор, показывающий логические состояния исследуемых сигналов в момент прихода управляющих тактовых импульсов. Они поступают либо от исследуемого устройства (например, тактовые импульсы микропроцессорной системы), либо вырабатываются встроенным генератором тактовых импульсов самого логического анализатора. Первый логический анализатор появился в 1967 году как личный «стендовый проект» инженера HP Гэри Гордона

Логические анализаторы имеют два режима работы:

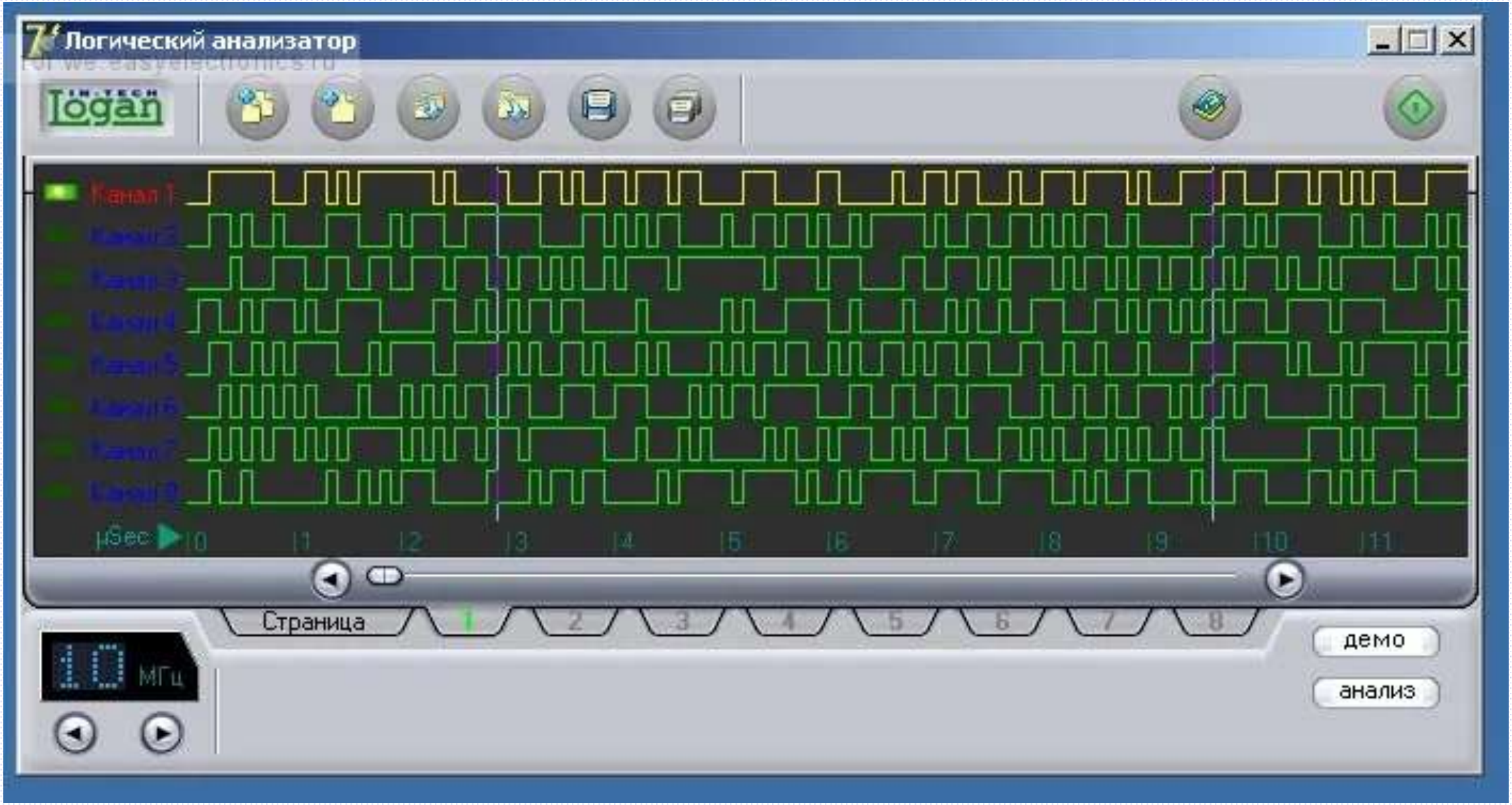
- Режим анализатора логических состояний (АЛС или State Analyser))
- Режим анализатора временных диаграмм (АВД) или анализатор временных соотношений (АВС или Timing Analyser).

Современные логические анализаторы, как правило, поддерживают оба режима работы.

Анализаторы логических состояний позволяют записать во внутреннюю память и затем воспроизвести на индикаторе последовательность логических уровней входных сигналов с частотой, соответствующей тактовой частоте исследуемого устройства (*синхронны*й режим сбора данных).

За период тактовой частоты АЛС определяет только один уровень входного сигнала («0» или «1»). Синхронные АЛС фиксируют только временные сдвиги, кратные периоду тактового генератора исследуемой схемы, и, следовательно, выявляют только нарушения в логике работы схемы.

При выводе информации на экран АЛС используют упрощенные графические изображения битовой последовательности (обычно в виде прямоугольных импульсов) или таблицы истинности в виде матрицы, состоящей из нулей и единиц.


Логический анализатор
IN-TECH
Logan
Канал 1
Канал 2
Канал 3
Канал 4
Канал 5
Канал 6
Канал 7
Канал 8
μSec
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
Страница
1
2
3
4
5
6
7
8
10
МГц
демо
анализ

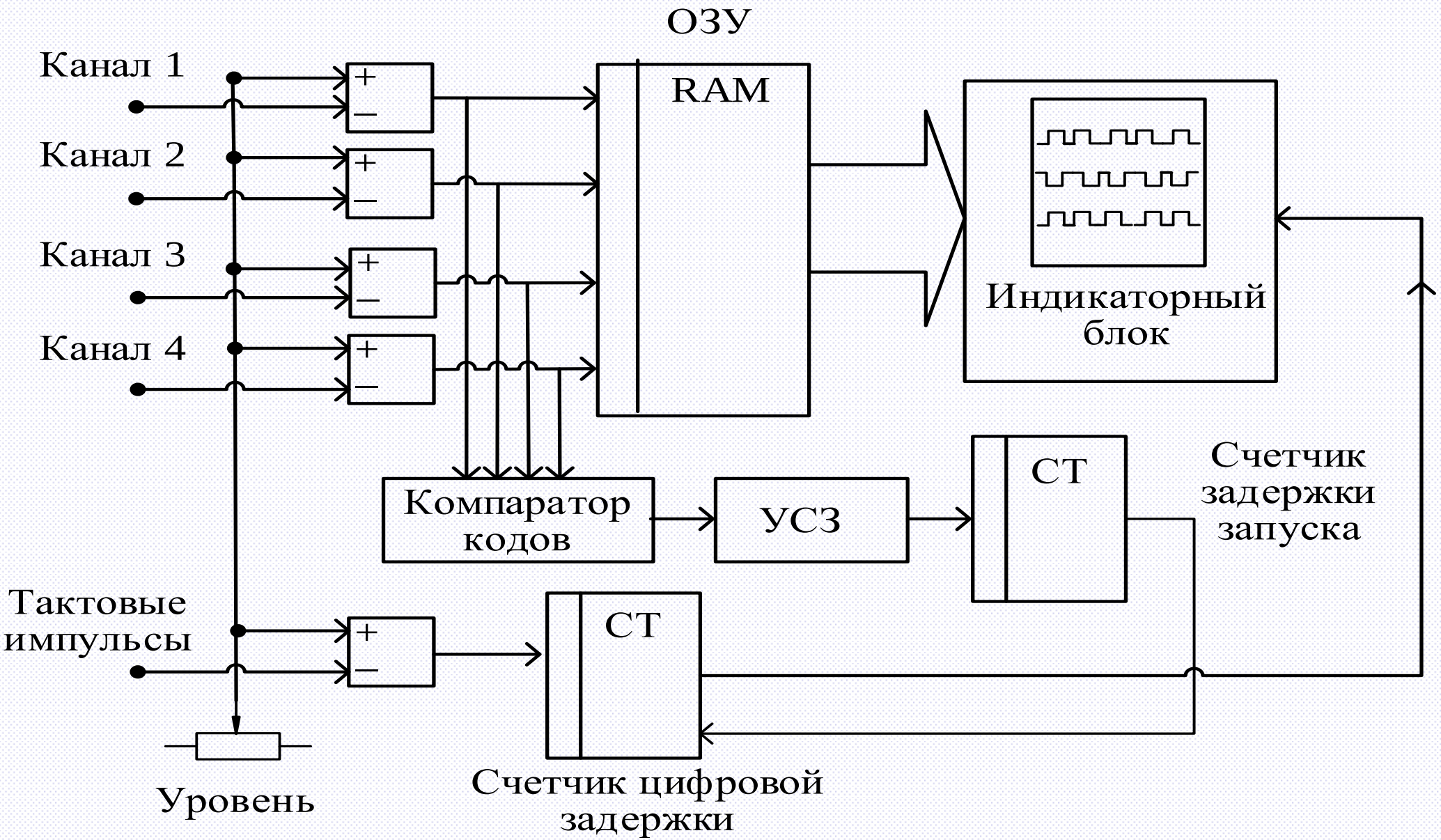
Анализаторы временных диаграмм реализуют асинхронный способ сбора данных с частотой, в несколько раз превышающей частоту тактирования потока входных данных. Это позволяет построить «квазивременные» диаграммы сигналов, напоминающие осциллограммы дискретизированного сигнала ЦО, но с фиксированным двоичным уровнем по вертикали!!!

Таким образом, анализатор временных диаграмм представляет собой многоканальный цифровой осциллограф с разрешением по вертикали 1 бит. АВД позволяет отслеживать связь между сигналами по положению фронтов импульсов, могут измерять абсолютные значения временных сдвигов между сигналами, вывлять ошибки и сбои в работе цифровых устройств из-за неучтенных задержек, емкостных эффектов, импульсных помех и т.д.

Логические анализаторы обоих видов позволяют решить следующие измерительные задачи:

- тестирование и отладку работы цифровых систем и цифровых каналов передачи;
- одновременное отображение большого количества цифровых сигналов и исследование их взаимосвязи;
- обнаружение сбоев и рассогласований цифровых сигналов, фиксация помех;
- отладку выполняемых цифровыми устройствами программ.

Обобщенная структурная схема типового логического анализатора



Многоканальный ЛА включает в себя набор компараторов на входах прибора. Каждый компаратор представляет собой одноразрядный АЦП, на выходе которого формируется битовый поток цифрового сигнала. Уровень срабатывания компараторов регулируют для стабильного преобразования входных импульсов в бинарный код.

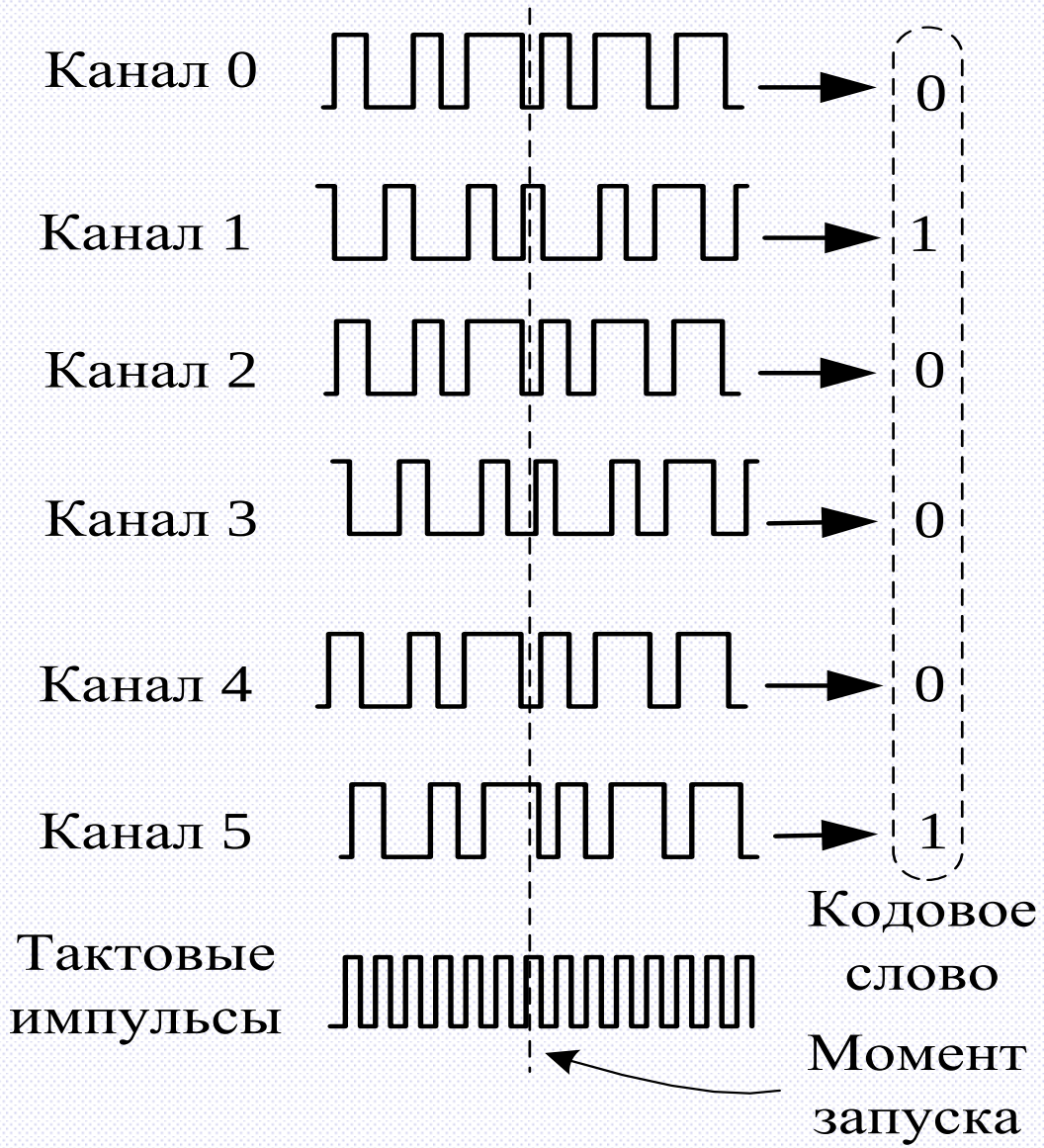
Для *синхронного* режима работы в ЛА предусматривают ввод тактовых импульсов из исследуемого устройства. *Асинхронный* режим (для анализатора временных диаграмм) обеспечивают внутренним генератором тактовой частоты ЛА. Частота тактовых импульсов в этом случае должна быть много больше тактовой частоты синхронного режима

Массив цифровых данных с компараторов поступает в ОЗУ анализатора, которое называют «памятью логических последовательностей»

В случае заполнения памяти запись в нее продолжается циклически с нулевого адреса (неперывная перезапись данных по кругу – «кольцевой буфер»). Таким образом, в памяти всегда хранятся N последних принятых слов, где N - емкость ОЗУ

Для старта анализа («запуск» ЛА) используют различные способы. Например, используют ***задержку запуска*** ЛА на целое число тактовых импульсов, для чего в схеме предусматривают счетчик цифровой задержки.

Другой способ – это запуск по заданной комбинации битов на входах прибора. Сигнал запуска вырабатывается компаратором кодов, который сравнивает цифровые сигналы в каналах ЛА с введенным предварительно кодовым числом.



Программы, выполняемые в исследуемом устройстве содержат циклы, так что выбранное кодовое слово в циклах может встречаться многократно. Чтобы анализатор мог различать циклы, в устройство запуска добавляют счетчик проходов. Такой режим называется запуском ***по последовательностям слов***

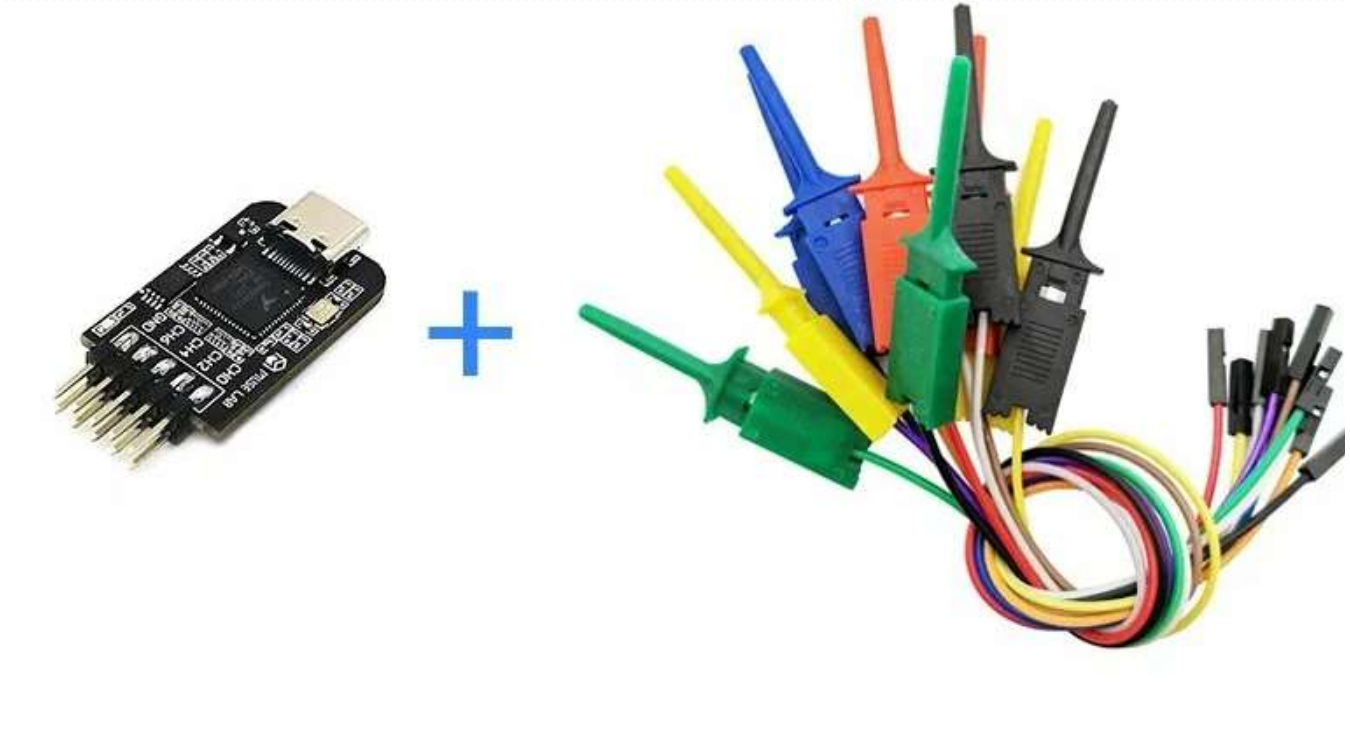
Для борьбы с импульсными помехами и случайными сбоями передачи сигналов (*глитчи Glitch)* в ЛА предусматривают запуск ***по несовпадению***. ЛА использует заданный заранее шаблон, с которым сравнивает последующую последовательность данных. Если данные не совпадают, производится запуск ЛА.

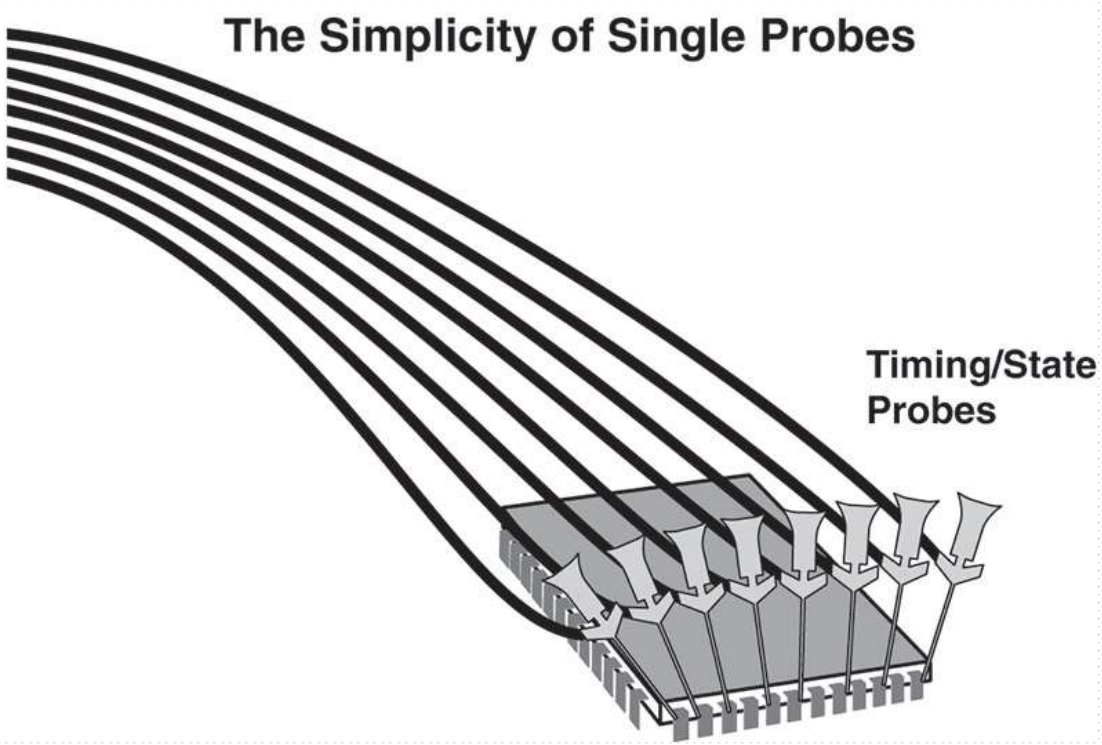
Следующая группа условий — это запуск ***по помехе***. ЛА включает в себя встроенный программный детектор помех, который позволяет выделить в потоке входных данных сигнал, отличающийся от полезного по длительности, уровню и пр. Такой сигнал фиксируется как помеха, ЛА запускается и показывает логическое состояние сигналов в этот момент времени.

Другой способ подразумевает запуск ЛА от цифрового осциллографа, применяемого совместно с ЛА. Например, ЦО контролирует длительность входных импульсов и запускает ЛА при ее несоответствии заданной (режим запуска ***по ширине импульса-*** Pulse Width triggering). Режим запуска ***по перепаду*** (Edge trigger) – это запуск по положительному или отрицательному перепаду сигнала в момент, когда он пересекает заданный уровень. Запуск ***по длительности перепада*** (Edge Transition trigger) производится по перепаду (положительному, отрицательному или обоим сразу), который превышает по длительности заданное значение времени.

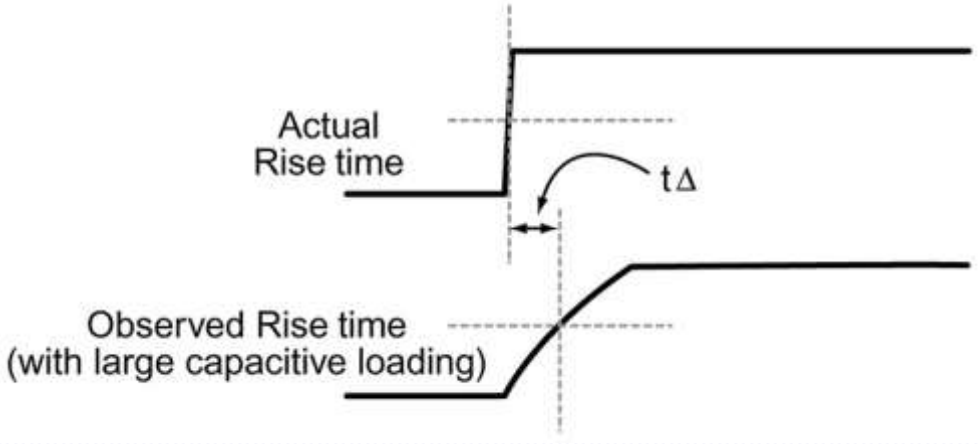
Запуск по ***помехе типа «глитч»*** предполагает поиск кратковременных выбросов в сигнале (глитчей) с помощью ЦО и запуск ЛА в моменты их появления. Запуск ***по помехе типа «рант»*** (Runt trigger) используют для обнаружения импульсов в цифровых сигналах, которые имеют уровень амплитуды ниже логического порога.

Логические анализаторы снабжаются многопроводными специальными щупами и зажимами (клипсами). Это пробники общего назначения с гибкими выводами.



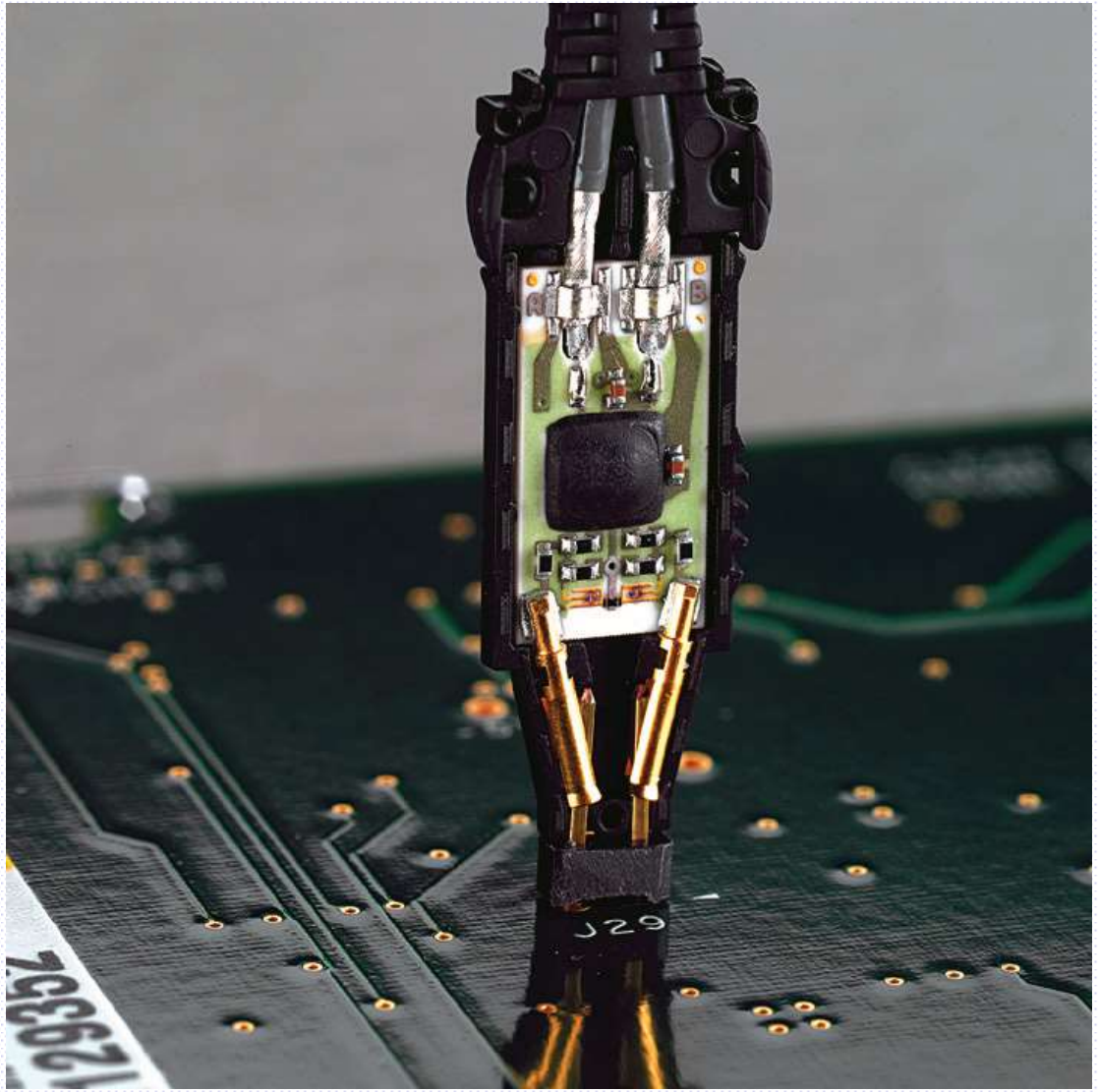


ЛА требует доступа к контролируемым точкам цифрового устройства (например, к выводам микросхем или трассам линии передачи). Для подключения ЛА к объекту измерения используют многоканальные выносные пробники. Такие пробники должны обладать высоким входным сопротивлением и малой входной емкостью, чтобы снизить влияние прибора на испытуемое устройство. В системах с высокой тактовой частотой большая емкость пробника может привести даже к неработоспособности исследуемого устройства.

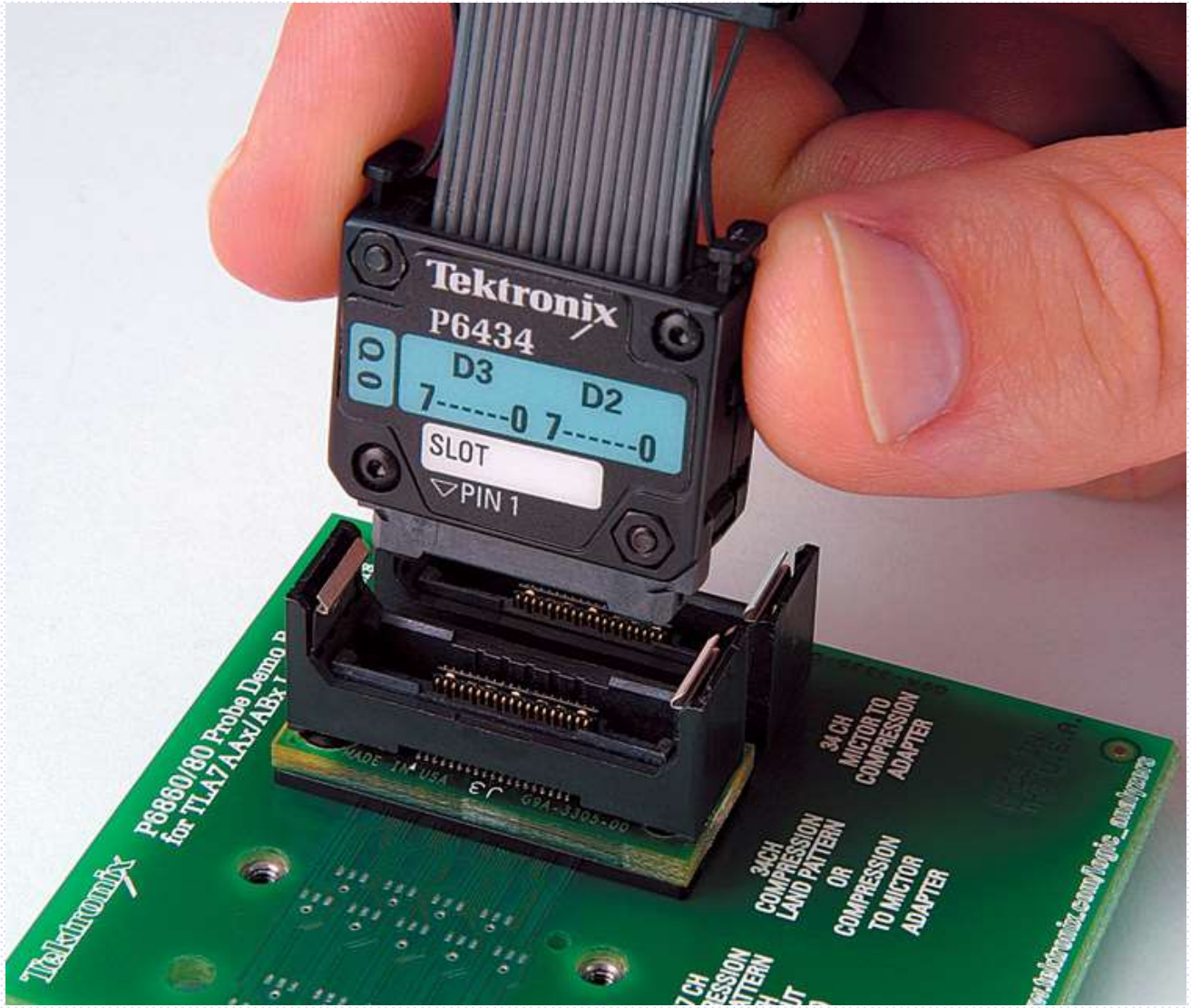


Влияние импеданс щупа логического анализатора на время нарастания сигнала и измеряемые временные соотношения.

Специализированные пробники ЛА позволяют получить надежное подключение и снизить влияние анализатора на результат измерения. Это многоканальные пробники-соединители, для которых предусматривают соответствующие разъемы на платах исследуемого устройства. Широко используют многопроводные безъземные соединители, которые присоединяются к исследуемой плате с помощью прижимного крепления. Этот тип пробника применяют в тех случаях, когда требуется обеспечить быстрое и надежное присоединение к исследуемой системе.



Зонд логического анализатора общего назначения с штыревым адаптером 0,025 дюйма. (0.6 мм)

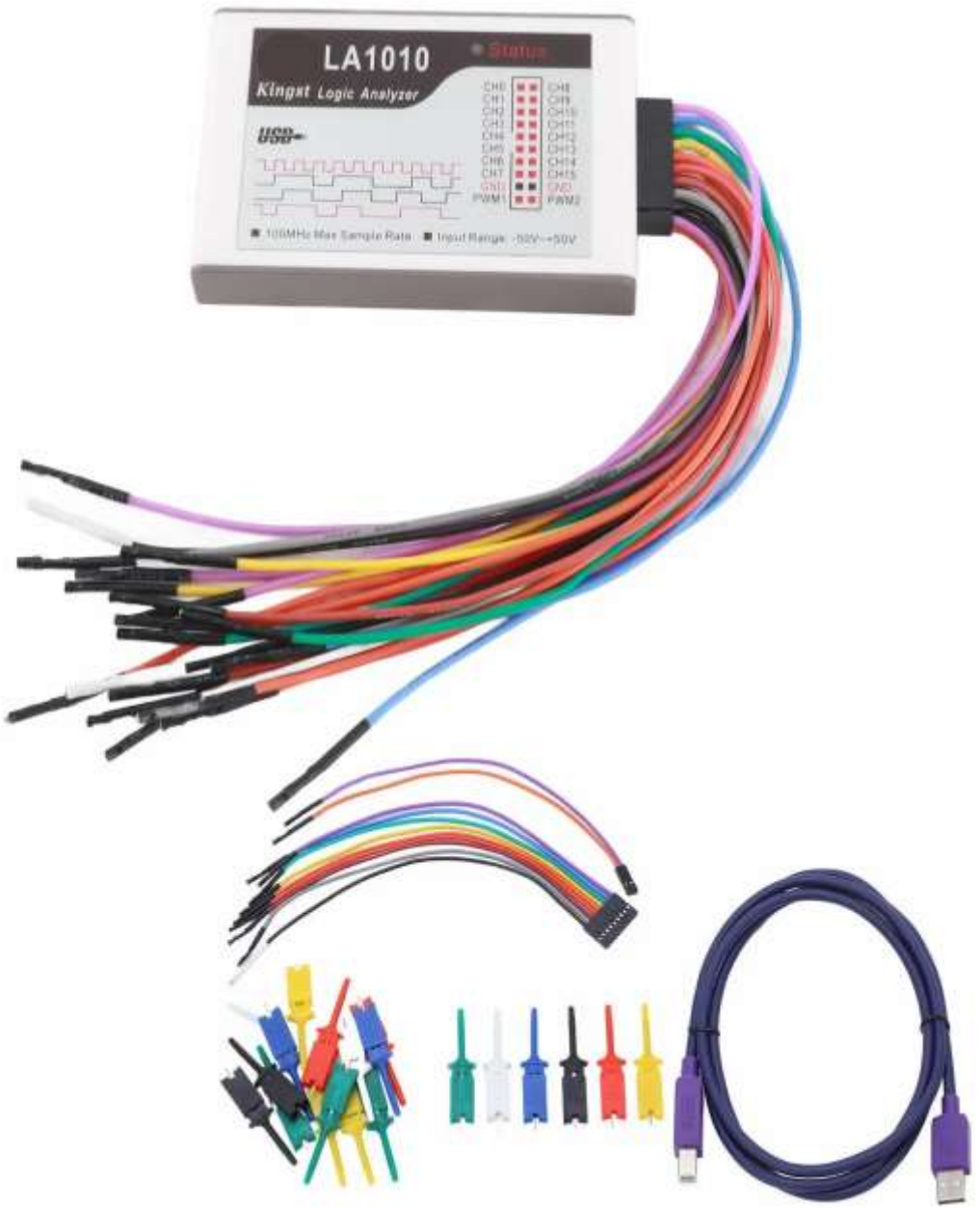


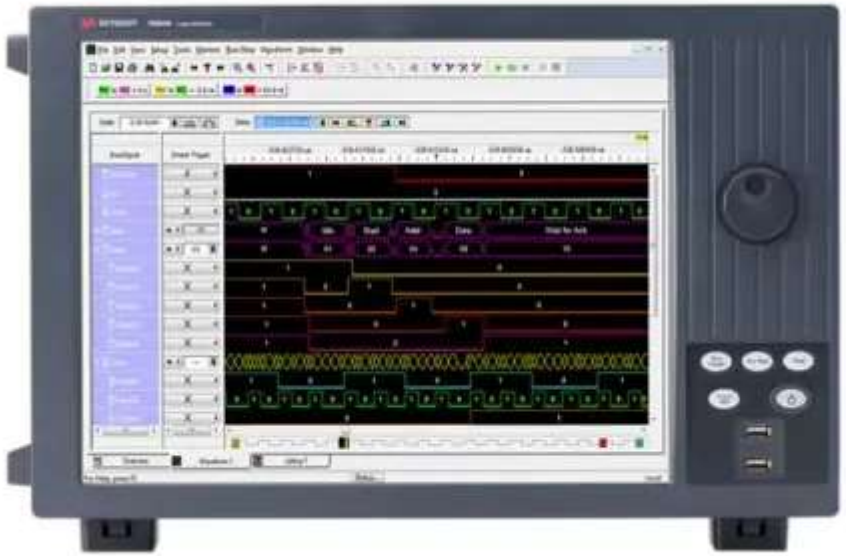
Многоканальный логический пробник



Логический USB-анализатор 16-ти канальный RIGOL RPL1116







6864A - Портативный логический анализатор Keysight Technologies (Agilent)

Конфигурация логического анализатора

136 каналов, частота тактового сигнала в режиме анализа логических состояний (АЛС) 350 МГц, частота сбора данных в режиме анализа временных диаграмм (АВД) 2,5 ГГц,

Анализ временных диаграмм (асинхронный режим сбора данных)

Частота сбора данных до 2,5 ГГц (при использовании всех каналов),

Глубина памяти: до 128 Мбайт (при использовании всех каналов

Анализ логических состояний (синхронный режим сбора данных)

Скорость передачи данных до 1,4 Гбит/с, частота тактового сигнала до 700 МГц для захвата высокоскоростных потоков данных

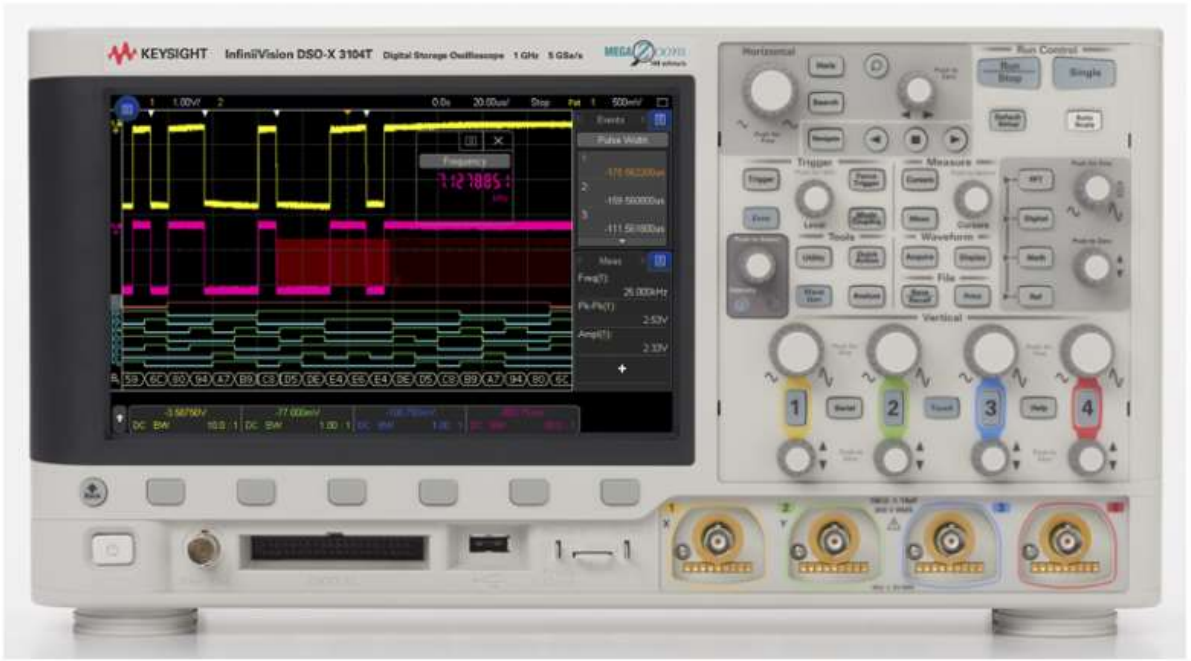
Автоматическое определение порогового уровня/позиции сбора данных для точного измерения характеристик высокоскоростных шин

Осциллографы смешанных сигналов (MSO Mixed Storage Oscilloscopes)

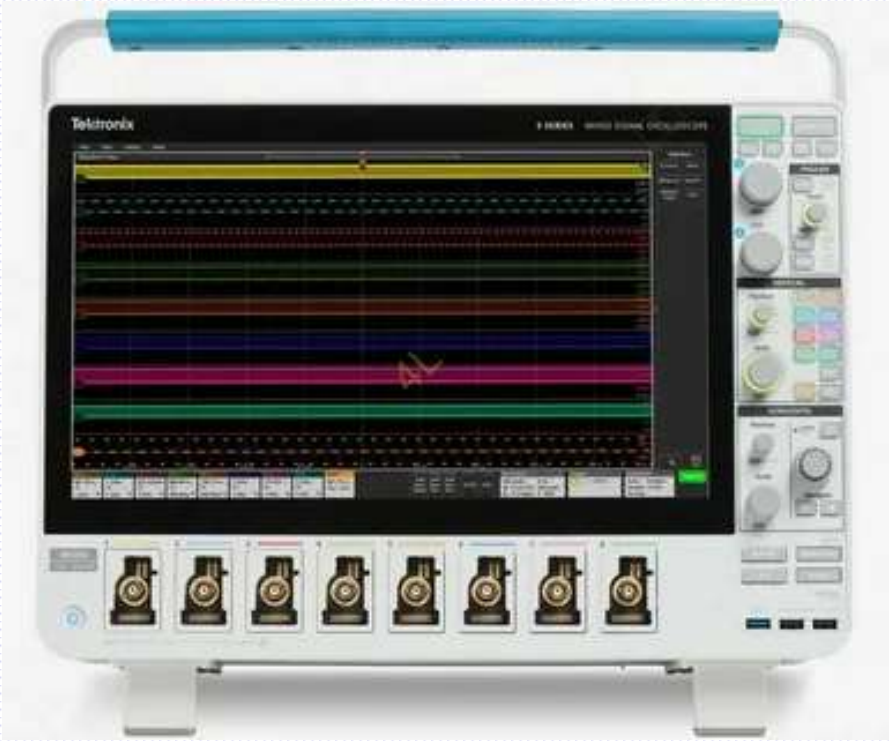
Для одновременного исследования формы сигналов на физическом уровне (осциллограмм) одновременно с анализом их логических диаграмм применяют осциллографы смешанных сигналов . Такие осциллографы имеют, как правило, 2 или 4 канала аналоговых сигналов и 8…16 (реже 32) канала ввода цифровых сигнало в режиме ЛА. Конструктивно вход цифровых сигналов выполняют в виде разъема на передней или задней панели, куда подключают логический многопроводный пробник.

Осциллограф смешанных сигналов можно использовать как автономный ЦО или логический анализатор с относительно небольшим количеством входных каналов. Однако наиболее важен режим совместного использования ЦО и ЛА для анализа логических диаграмм сигналов с запуском от ЦО, просмотр формы сигнала на аналоговых входах ЦО при запуске от ЛА по кодовому слову, по помехе, по длительности импульса или глитча и пр. Вывод осциллограмм и диаграмм при этом производят на один экран, что позволяет сравнить форму сигналов с их логической структурой.

Осциллографы смешанных сигналов (MSO Mixed Storage Oscilloscopes)

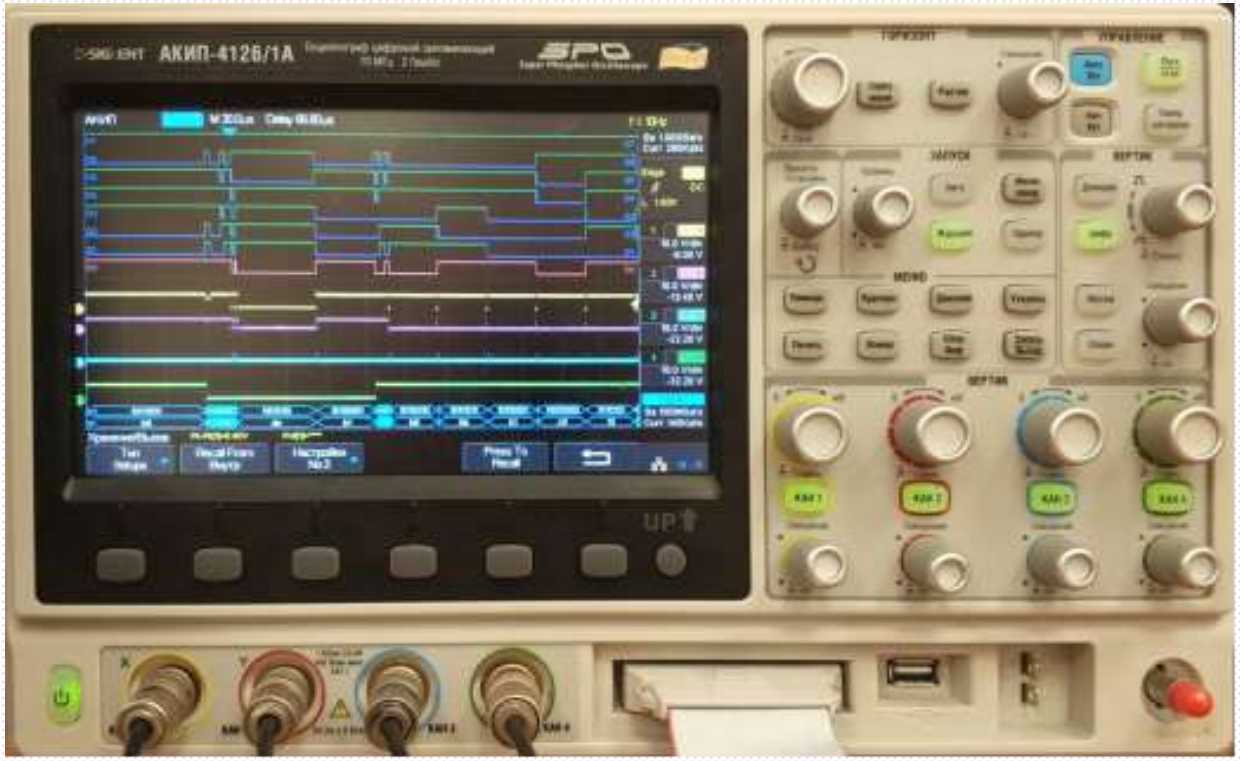


Осциллограф смешанных сигналов keysight MSO-X 3104T (InfiniiVision 3000T X-Series). 4-канальный MSO + 16 логических каналов. Полоса пропускания 1 ГГц (5 Гвыб/с), глубина памяти 4 М точки



Tektronix MSO54 5 BW 350 — цифровой осциллограф смешанных сигналов
Разрешение по вертикали 12 бит. 4 аналоговых входа и 32 цифровых входа опционально с пробником TLP058. полоса пропускания 350 Мгц, 6,25 Гвыб/сек, скорость вывода >500000 осц/сек, глубина памяти 62,5 М точек (125 М точек - опция)

Осциллограф смешанных сигналов АКИП 4126/1А (SIGLENT SDS2074)



Характеристика	Значение
Количество каналов	4
Частота дискретизации АЦП	1 ГГц
Полоса пропускания по уровню -3 дБ	70 МГц
Время нарастания переходной характеристики	5 нс
Скорость обновления осциллограмм	110 000/с
Разрешающая способность экрана	800x480 (диагональ 20см)
Максимальная длина записи (глубина памяти)	14 Мбайт
Диапазон коэффициентов отклонения. Ко	2 мВ/дел.10В/дел
Погрешность установки. Ко	±3%
Диапазон коэффициентов развертки Кр	1 нс/дел…50с/дел
Погрешность установки Кр	±0.0025%
Входной импеданс	1 Мом, 23 пФ или 50 Ом

Осциллограф смешанных сигналов АКИП 4126/1А (SIGLENT SDS2074)



DAV

NRFD

NDAC

ATN

Осциллограмма сигналов команд интерфейса GPIB

Осциллограф смешанных сигналов АКИП 4126/1А (SIGLENT SDS2074)



DAV
NRFD

NDAC
ATN

Осциллограмма сигнала первой команды GPIB в режиме растяжки

Осциллограф смешанных сигналов АКИП 4126/1А (SIGLENT SDS2074)

Знач.	+	0	.	0	5	2	0
ASCII HEX	2B	30	2E	30	35	32	30
D7	0	0	0	0	0	0	0
D6	0	0	0	0	0	0	0
D5	1	1	1	1	1	1	1
D4	0	1	0	1	1	1	1
D3	1	0	1	0	0	0	0
D2	0	0	1	0	1	0	0
D1	1	0	1	0	0	1	0
D0	1	0	0	0	1	0	0



Декодировка диаграммы цифровых сигналов

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

