

# **Цифровой осциллограф: вводная презентация**

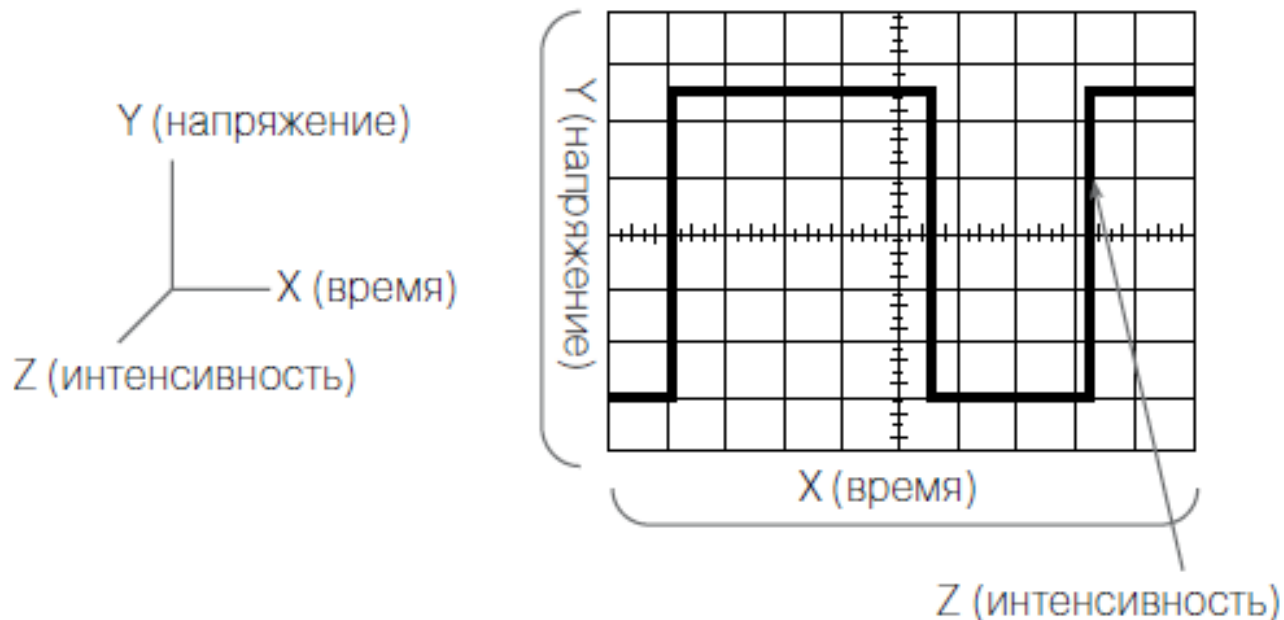
- *Осциллографы: аналоговые (ЭЛО) и цифровые (ЦО)*
- *Принцип работы и характеристики ЦО*
- *Применение ЦО для амплитудных и временных измерений.*
- *Пост-обработка результатов измерений с ЦО*
- *Пример ЦО: Le Croy WaveRunner 640Zi и его возможности*
- *Литература*

# Автоматизированные системы накопления и обработки данных ядерно-физического эксперимента

- Данные, получаемых в ходе ядерно-физического эксперимента с помощью детекторов (датчиков) в подавляющем большинстве случаев **преобразуется в электрические сигналы.**
- Для работы с этими электрическими сигналами применяются электронные устройства в виде модульных блочных систем в стандарте CAMAC, VME, NIM. Для проведения даже не очень сложных исследований, например, измерение амплитудных и временных характеристик фотоумножителей, необходима установка из десяти-пятнадцати модулей, расположенных в двух крейтах.
- В настоящее время появились новые устройства – **цифровые осциллографы**, которые могут для большой серии измерений заменить сложные установки в ядерном эксперименте (кроме своей основной функции – быть измерительным инструментом).

**Осциллограф** – прибор, отображающий получаемую информацию в графическом виде (т.е. виде диаграммы/рисунка электрического сигнала)

В большинстве приложений, диаграмма отражает изменения сигнала во времени: вертикальная ось (Y) представляет значения напряжения, а горизонтальная ось (X) – время. Выводимая на экран кривая (отражающая форму сигнала) показывает изменения уровня напряжения с течением времени. Интенсивность или яркость выведенной на экран прибором картинки иногда называется осью Z.

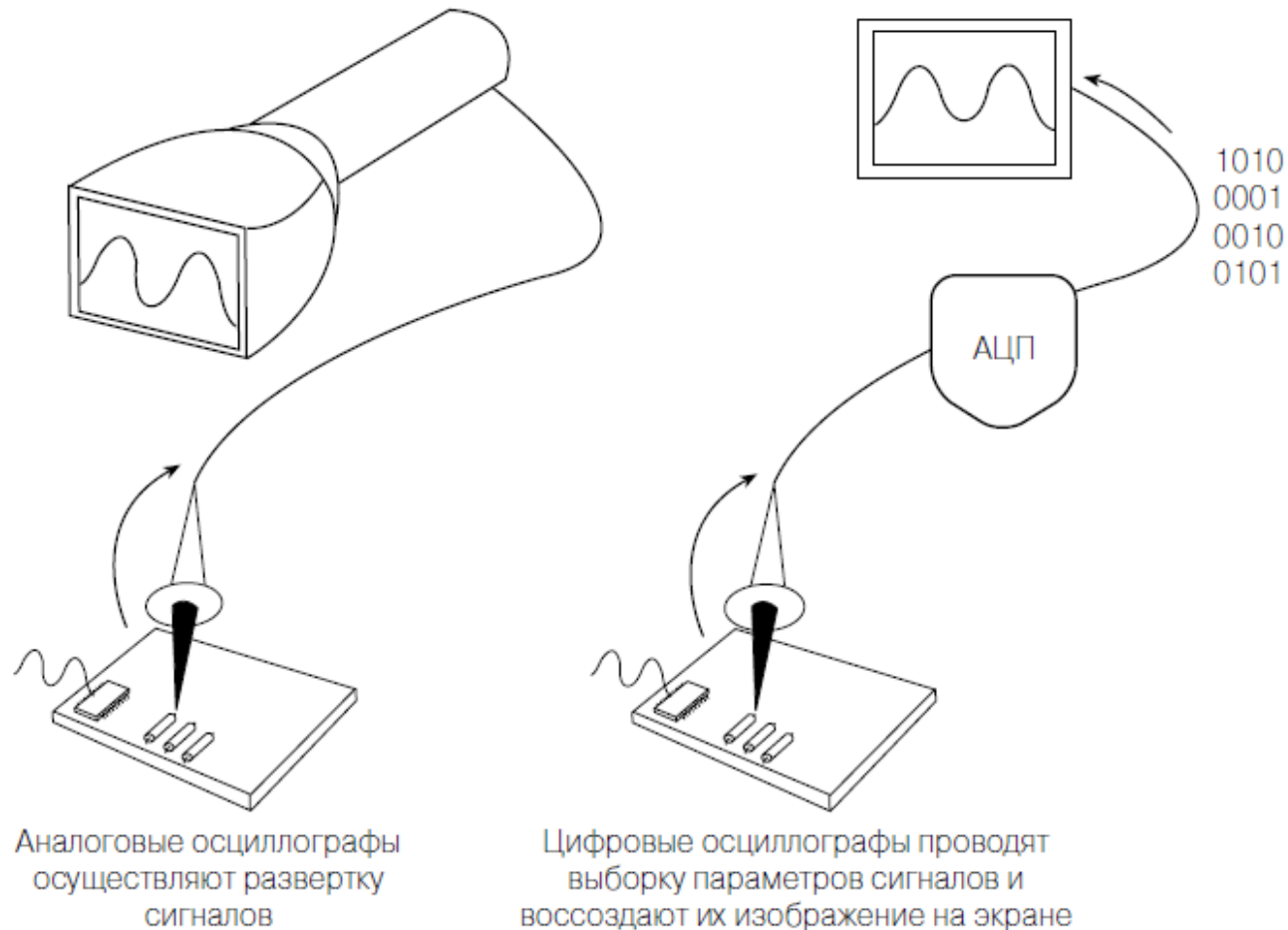


## **История создания осциллографа (oscilloscope)**

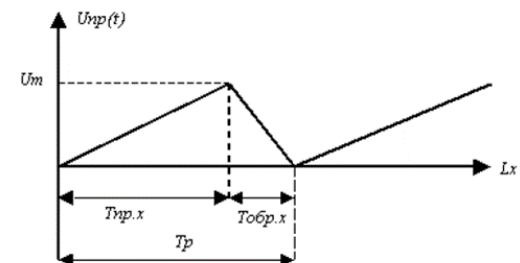
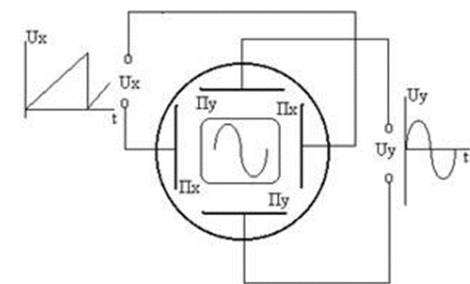
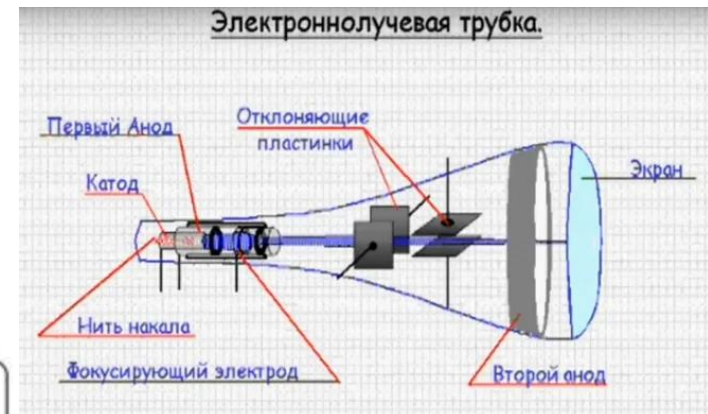
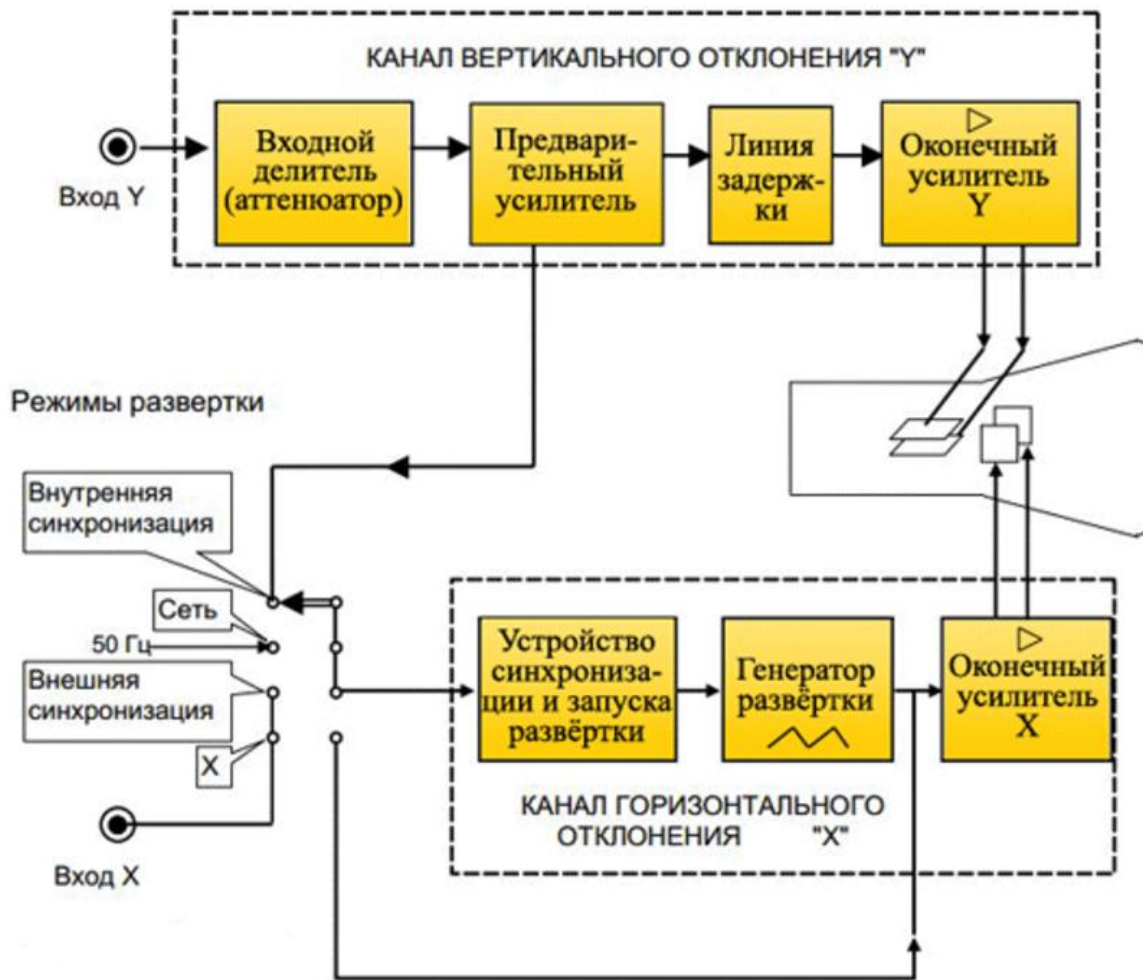
- 1895: немецкий физик **Карл Фердинанд Браун** (Нобелевская премия по физике 1909) создал катодную трубку, получившую название трубки Брауна. Луч отклонялся с помощью электромагнита только в одном измерении, второе направление развёртывалось при помощи вращающегося зеркала.
- 1899: **Джонатан Зеннек** оборудовал электронно-лучевую трубку (ЭЛТ) формирующими луч пластинами.
- 1903: **Артур Венельт** поместил в трубке цилиндрический электрод (цилиндр Венельта), позволяющий менять интенсивность электронного луча, а соответственно и яркость свечения люминофора.
- 1931: **В. К. Зворыкин** представил электронно-лучевую трубку с термоэлектронной эмиссией, откачанную до высокого вакуума. Фирма General Radio Company использовала для выпуска опытного экземпляра осциллографа.
- 1947: **фирма Tektronix** выпустила на основе ЭЛТ первую модель аналогового осциллографа Tektronix Model 511.
- 1985: **Фирма LeCroy Corporation** выпускает первый цифровой осциллограф.

## Аналоговые и цифровые осциллографы:

аналоговые работают с непрерывно изменяющимися во времени значениями напряжения, а цифровые – с дискретными (бинарными) сигналами, представляющими собой выборки напряжения



# Аналоговый электронно-лучевой осциллограф (ЭЛО)



# Определение цифрового осциллографа

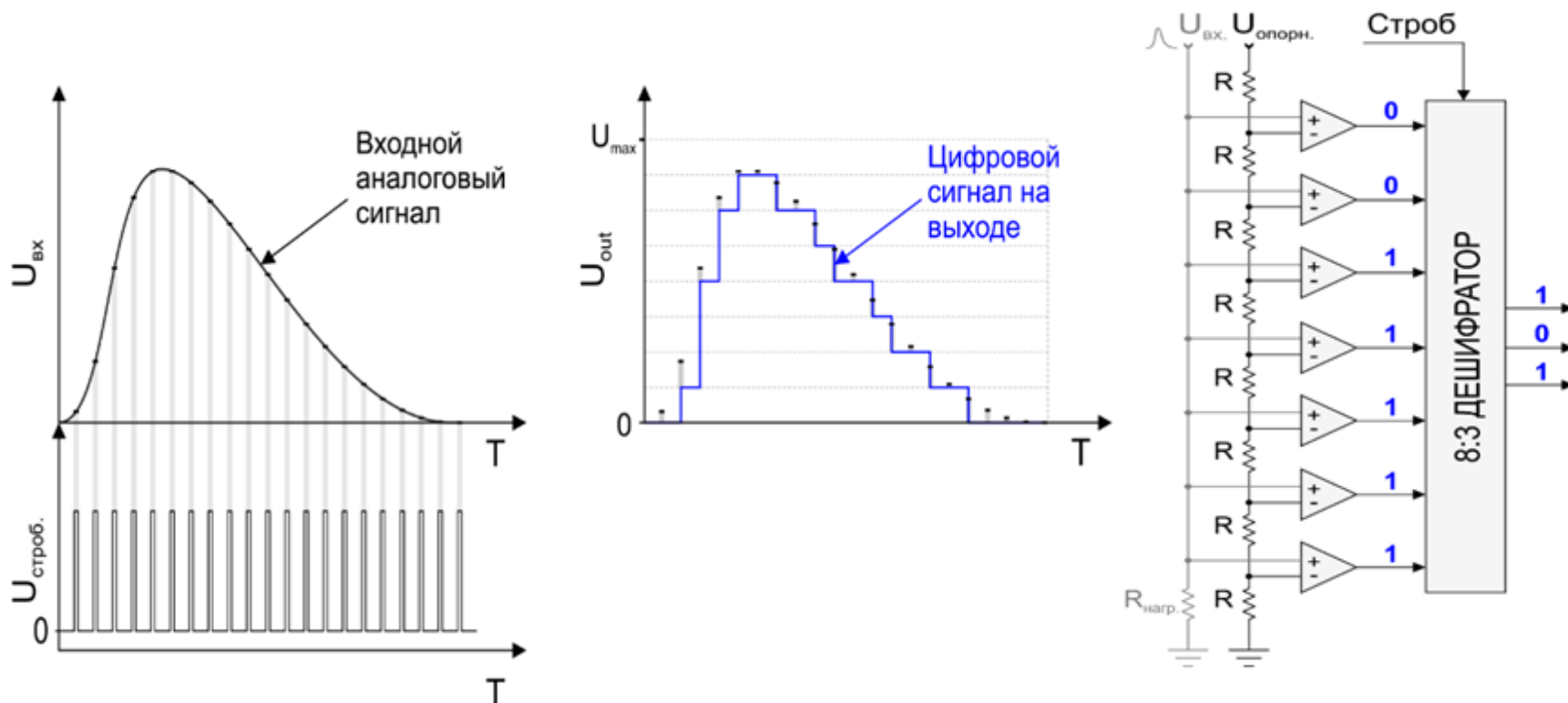
Цифровым осциллографом называется универсальный измерительный прибор, предназначенный для исследования электрических сигналов путем их преобразования в цифровую форму с последующим визуальным наблюдением на жидкокристаллическом дисплее, измерением их амплитудных и временных параметров, а также математической обработкой.

Источниками электрических сигналов могут быть как специальные генераторы и исследуемые электронные устройства, так и детекторы ядерных излучений.





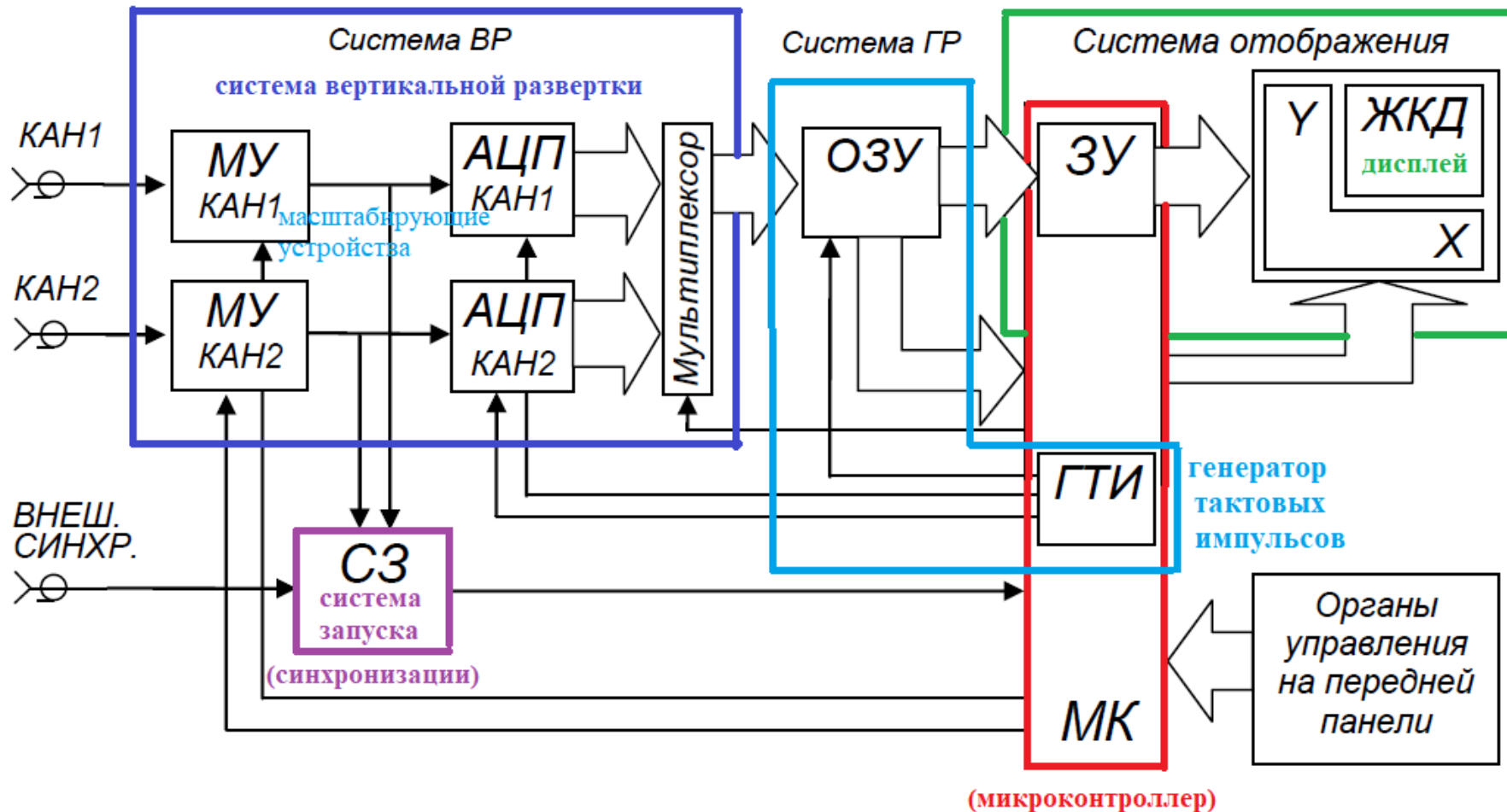
# Принцип работы цифрового осциллографа



Входной сигнал поступает на параллельный АЦП, который стробируется с высокой частотой генератором тактов временной выборки и код с АЦП поступает в запоминающее устройство.

Для обеспечения требуемой частоты преобразования применяется параллельно до 100 АЦП, которые обеспечивают требуемую частоту дискретизации.

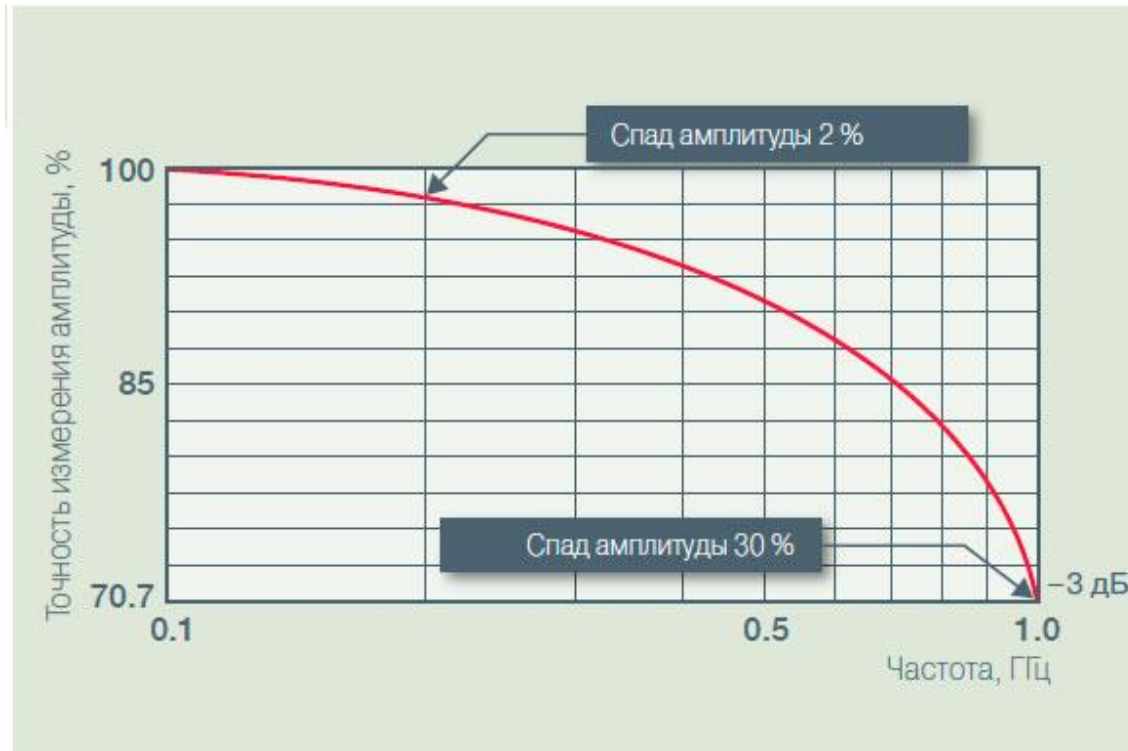
# Структурная схема цифрового запоминающего осциллографа



# Основные характеристики цифрового осциллографа

- Полоса пропускания, ГГц;
- Разрядность АЦП (обычно 8 – 12 бит или 256 – 4096 уровней квантования)
- Частота отсчётов (дискретизации) – число выборок в секунду, Мвыб/с (Мв/с) или MSa/s (Megasamples/s). Частоту дискретизации лучше указывать в числе отсчетов или точек, Мотсч/с.
- Объём памяти или длина записи, Мбайт или Гбайт (на канал или общая). Под одним байтом понимается значение одного отсчета (одной точки) сигнала, поэтому иногда объем памяти выражают в количестве точек. Объем памяти определяет максимальную длину сигнала, которую ЦО может зарегистрировать, не прерывая получения отсчетов с максимальной частотой дискретизации.
- Первая из этих четырёх характеристик определяется, в основном, аналоговой частью ЦО, находящейся на входе, т.е. до АЦП; вторая и третья – аналого-цифровым преобразователем; четвёртая – запоминающим устройством.

## Полоса пропускания ЦО, Гц... ГГц



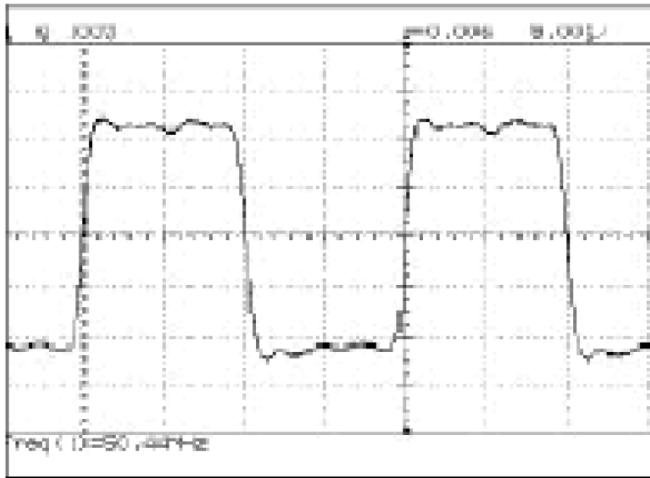
Полоса пропускания измеряется в **герцах** и отражает диапазон частот, в пределах которого осциллограф может выполнять точные измерения. Полоса пропускания определяется как частота, на которой входной сигнал ослабляется на 3 дБ (децибел), что соответствует уменьшению амплитуды примерно до 70,7 % от его первоначального значения. Это означает, что сигналы с этой или более высокой частотой не могут быть точно измерены осциллографом.

$$N_{дБ} = 20 * \log_{10} U2/U1$$

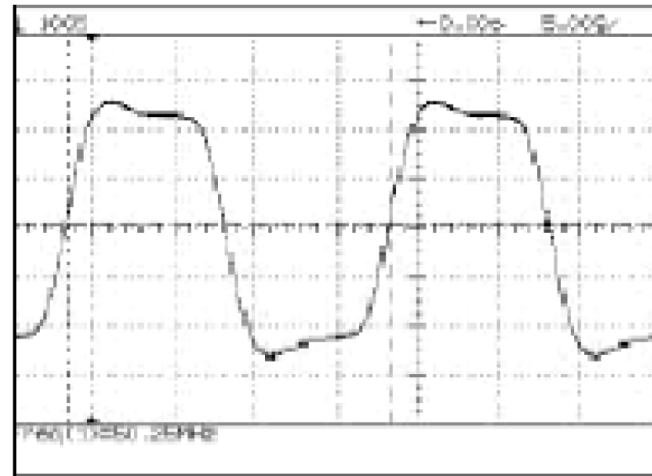
## ***Полоса пропускания ЦО:***

### ***Изображение прямоугольного сигнала частотой 50 МГц***

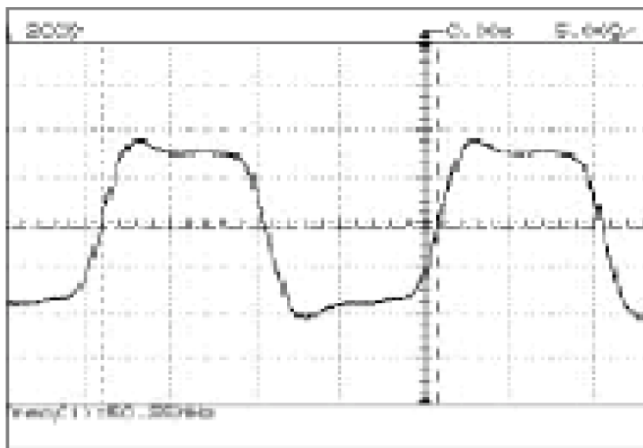
Периодический прямоугольный сигнал содержит значимые (по уровню) составляющие, которые  $\geq 10$  раз больше по частоте по сравнению с основной частотной компонентой сигнала. Осциллографы с большей полосой пропускания предоставят более детальную информацию об этих высокочастотных составляющих.



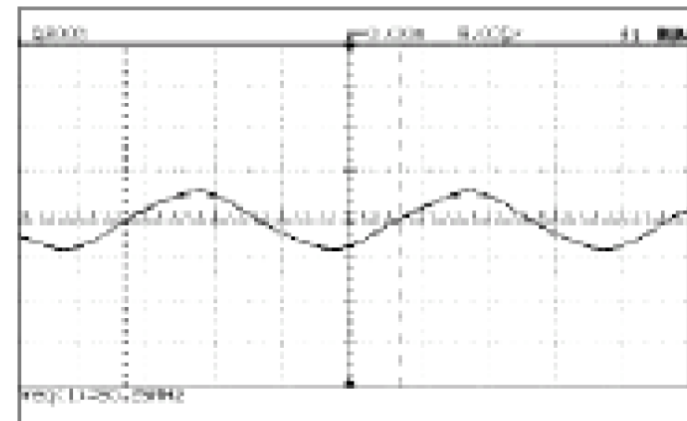
на экране ЦО с полосой 500 МГц



на экране ЦО с полосой 150 МГц



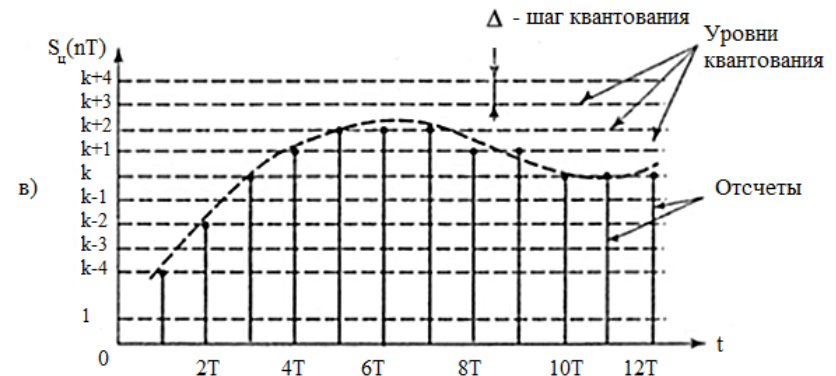
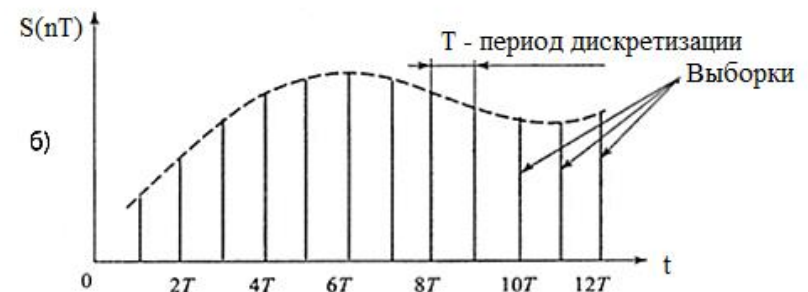
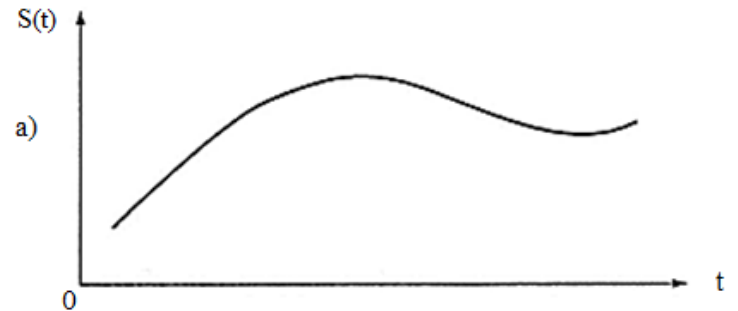
на экране ЦО с полосой 50 МГц



на экране ЦО с полосой 20 МГц

# Разрядность АЦП и квантование

- Разрядность АЦП - это число разрядов в числе уровней квантования входного сигнала, записанном в двоичной форме
- Квантованием называется процесс замены непрерывного множества значений сигнала дискретным множеством значений. Шаг (ступень, интервал) квантования есть разность соседних уровней квантования.
- При аналого-цифровом преобразовании амплитуда выборки преобразуется в  $M$ -разрядное двоичное число, поэтому число уровней квантования  $n = 2^M$ .
- Число ступеней квантования  $S = 2^M - 1$ .
- Пример.** Допустим, мы имеем АЦП 8-бит (256 уровней сигнала). Т. е. сигнал с амплитудой 10 В он может перевести в цифровой код с точностью 0,04 В, а если у АЦП 10 разрядов (1024 уровня), то мы сможем наблюдать этот же сигнал с точностью 0,01 В.



## Частота отсчетов (дискретизации), Мвыб/с (MSa/s, мегасэмпл в секунду)

- Частота дискретизации — это количество отсчетов (т. е. дискретных значений), которые цифровой осциллограф может захватить в секунду. Частота дискретизации задает горизонтальное разрешение принятого сигнала.
- Частоту дискретизации указывают в числе выборок в секунду: например, Мвыб/с, а в иностранной литературе — MSa/s или MS/s (мегасэмпл в секунду).
- В отечественной литературе под выборкой иногда понимают несколько выбранных отсчётов, поэтому частоту дискретизации лучше указывать в числе отсчётов или точек в секунду: например, Мотсч/с.
- Частота дискретизации должна быть хотя бы в 2 раза выше полосы пропускания ЦО; но в реальных ЦО обычно требуется в 4–10 раз.
- При регистрации однократных сигналов с длительностью  $t_u$  для их представления также надо иметь определенное число  $N$  отсчетов, так что период равномерной по времени дискретизации сигнала будет равен  $\Delta t = t_u / N$ , а частота дискретизации  $f_d = 1/\Delta t = N/t_u$ .
- Пример. Чтобы сигнал длительностью  $t_u = 0,1$  мкс представить 100 отсчетами, нужны  $\Delta t = 1$  нс и частота дискретизации  $f_d = 1$  Гвыб/с.

## Теорема Котельникова и определении частоты дискретизации\*

**Дискретизацией** называется процесс замены мгновенных значений непрерывного сигнала совокупностью его дискретных значений (выборок), полученных в последовательные моменты времени  $t_i + \Delta t$ . Интервал времени  $\Delta t = t_{i+1} - t_i$  называется шагом или интервалом дискретизации. Дискретизация бывает равномерной с шагом  $\Delta t = \text{const}$  и неравномерной с шагом, значение которого меняется либо по определенному закону, либо случайно. Говорят, что при равномерной дискретизации выборки производятся в реальном масштабе времени, а при неравномерной – в эквивалентном масштабе времени.

Минимально возможное значение  $\Delta t$  равно времени преобразования АЦП. Частоту дискретизации  $f_s = 1/\Delta t$  (sample rate) иногда называют частотой выборки или частотой сэмплирования.

При определении частоты дискретизации, необходимо пользоваться теоремой Котельникова (теорема Найквиста), которая гласит, что произвольный аналоговый сигнал  $x(t)$  с ограниченным спектром может быть однозначно восстановлен по его отсчетам, взятым с частотой  $f_s \geq 2f_{\text{max}}$ , где  $f_{\text{max}}$  — граничная частота спектра сигнала. При этом сигнал  $x(t)$  можно представить в виде ряда

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k\Delta) \operatorname{sinc} \left[ \frac{\pi}{\Delta} (t - k\Delta) \right],$$

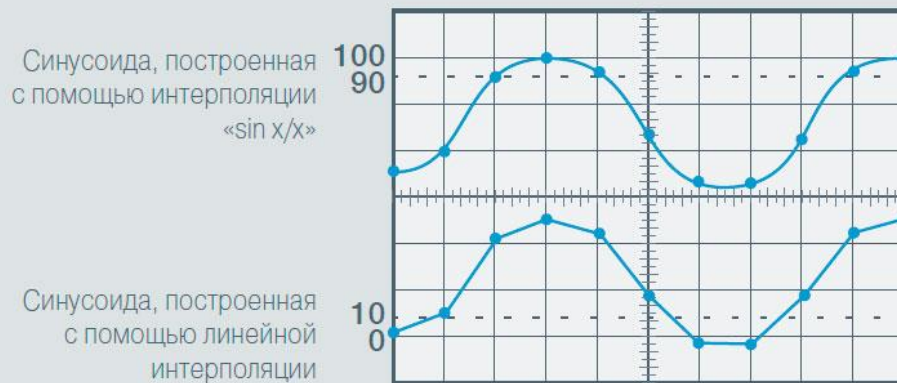
где  $\operatorname{sinc}(x) = \sin x / x$  и интервал дискретизации удовлетворяет условию  $0 < \Delta \leq 1/2f_{\text{max}}$  (т.е. предполагается ограничение частоты сверху).

Верхняя граничная частота спектра сигнала  $f_{\text{max}}$  может превышать полосу пропускания осциллографа  $f_v$ . Поэтому, как показывает практика, максимальная частота дискретизации  $f_s$  должна быть больше  $f_v$ , как минимум, в пять раз. В этом случае восстанавливающий фильтр осциллографа  $\sin x / x$  может точно воспроизводить форму высокоскоростных сигналов с разрешением в диапазоне десятков пикосекунд.

Частота дискретизации задается генератором тактовых импульсов (ГТИ), который иногда называют генератором развертки. Обычно ГТИ входит в состав микроконтроллера, который является управляющим центром осциллографа.



## Точность отображения сигнала зависит от частоты дискретизации и от используемого метода интерполяции.



- Линейная интерполяция соединяет выборки сигнала прямыми линиями, но такой подход ограничен реконструкцией сигналов с прямыми участками.
- Интерполяция **«sin x/x»** представляет собой математический процесс, в котором для заполнения промежутков между реальными выборками рассчитываются дополнительные точки.
- Следовательно, интерполяция «sin x/x» более предпочтительна для приложений, где частота дискретизации превышает полосу пропускания системы от 3 до 5 раз.

## Объем памяти (длина записи): общий (или на канал или на осциллограмму)

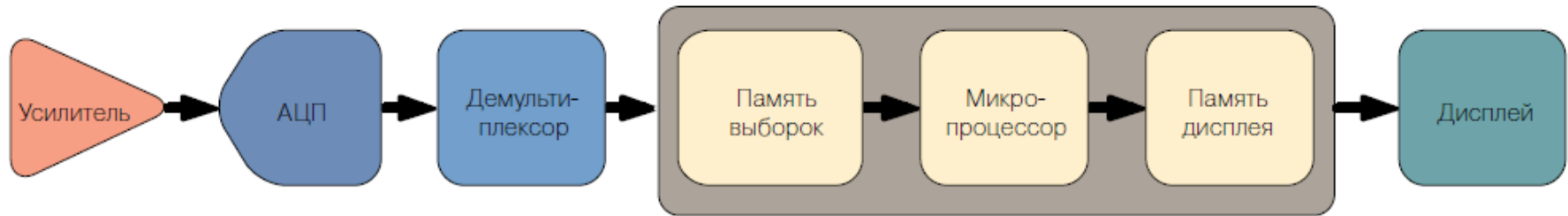
- Этот параметр выражается в килобайтах (кБ), мегабайтах (МБ) или гигабайтах (ГБ). **Под одним байтом понимается значение одного отсчёта (одной точки) входного сигнала, поэтому иногда объём памяти выражают числом точек.**
- Объём памяти ЦО определяет максимальную длину сигнала, которую ЦО может зарегистрировать, не прерывая получения отсчётов с максимальной частотой дискретизации.
- Чем больше объем памяти, тем больше информации об исследуемом процессе можно накопить в памяти и затем изучить ее по частям или обработать средствами, встроенными в осциллограф.



## ***Классы цифровых осциллографов***

- Цифровые запоминающие осциллографы (DSO – Digital Storage Oscilloscope),
- Осциллографы с цифровым люминофором (DPO – Digital Phosphor Oscilloscope)
- Осциллографы смешанных сигналов (MSO – Mixed Signal Oscilloscope)
- Виртуальные осциллографы (осциллографы на базе ПК, или т.н. USB-осциллографы)
- Стробоскопические осциллографы.
- ***Осциллографы с технологией X Stream II (фирмы LeCroy)***

## Структурная схема цифрового запоминающегося осциллографа (DSO – Digital Storage Oscilloscope)



- Основное отличие ЦО от электронно-лучевых осциллографов заключается в том, что мгновенные значения напряжения сначала переводятся в цифровую форму («оцифровываются») с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и запоминаются в цифровом запоминающем устройстве, после чего обрабатываются по различным алгоритмам и выводятся на экран.
- К ЦО относятся приборы, не просто имеющие цифровые средства (например, микропроцессорное управление или встроенные цифровые мультиметры), а осуществляющие цифровое преобразование аналоговых сигналов, их запоминание в памяти и вывод сигналов, представленных в цифровой форме.

# Осциллограф с цифровым люминофором (DPO – Digital Phosphor Oscilloscope)

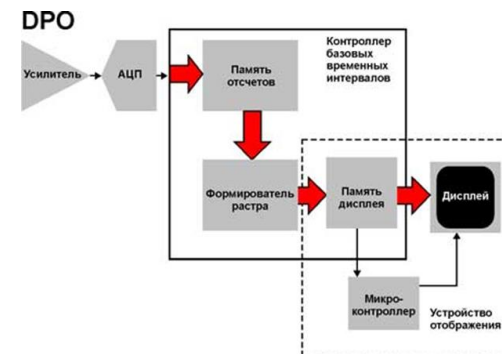
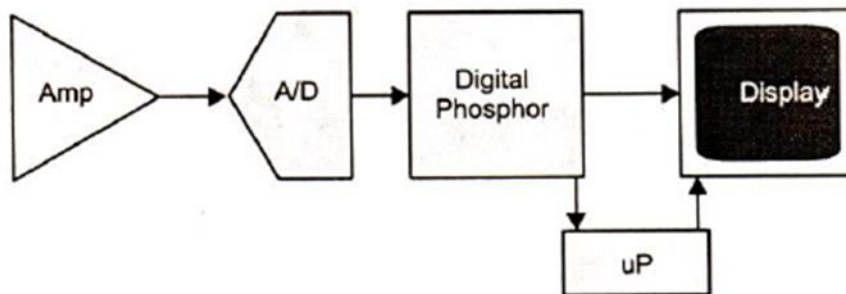


В этой технологии цифровыми методами имитируется способность изменять интенсивность свечения линии на экране в зависимости от повторяемости траектории луча, присущая люминофорам на экране аналоговых осциллографов. Линия осциллограммы на экране ЦО, повторяющаяся много раз при повторных изображениях этой осциллограммы, имеет сильную интенсивность. Чем реже повторяется линия, тем меньшую интенсивность она имеет.

Основное назначение технологии цифрового люминофора заключается в повышении степени визуализации всех сигналов, в том числе редко и случайно повторяющихся.

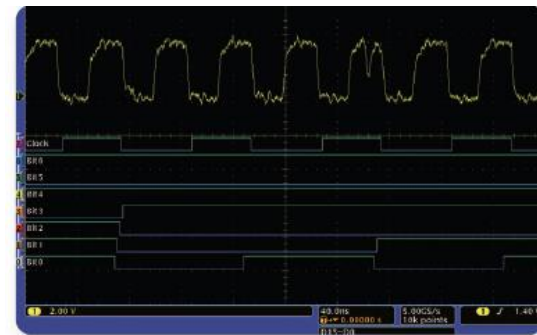
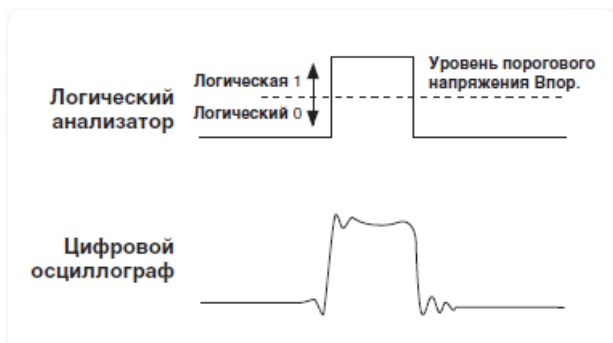
# Осциллограф с цифровым люминофором (DPO – Digital Phosphor Oscilloscope) - 2

- DPO переводит в растровый формат оцифрованные данные о форме сигнала в базу данных «цифрового люминофора». Специализированный процессор DPX преобразует оцифрованную осциллограмму в динамическую трехмерную базу данных, которую и называют «цифровым фосфором». Каждую 1/30-ую долю секунды изображение, сохранённое в этой базе, переносится системой отображения на дисплей. Каждый элемент этой трехмерной базы данных соответствует пикселю дисплея DPO-осциллографа. Если сигнал появляется в данной точке экрана часто, то яркость этой точки будет больше, чем у соседних точек, которые появляются реже. Таким образом, при отображении осциллограммы на экране прибора появляется новая переменная, характеризующая частоту появления сигнала в данной точке экрана. Если заменить яркостную шкалу цветовой шкалой, то появляется эффективная возможность цветового выделения редких аномалий сигналов. Такой процесс прямой растеризации данных о форме сигнала и непосредственное копирование из базы данных в память дисплея, устраняет недостаток, связанный с обработкой данных, что присуще любым другим типам ЦО. В результате на дисплее можно наблюдать «живые» сигналы в реальном времени. Все их подробности, перемежающиеся события, динамические характеристики – всё регистрируется в режиме реального времени. Микропроцессор DPO функционирует параллельно с интегрированной системой захвата, осуществляя управление дисплеем, автоматическими процедурами измерений и общее управление прибором. Таким образом, производительность процессора не влияет на скорость регистрации.



# Осциллограф смешанных сигналов (MSO – Mixed Signal Oscilloscope)

- Осциллограф смешанных сигналов представляет собой цифровой осциллограф со встроенным логическим анализатором. Это позволяет наблюдать аналоговый сигнал используя синхронизацию по значению на цифровой шине или цифровой сигнал используя синхронизацию по аналоговому процессу (т.е. сочетает в себе функции **цифрового осциллографа и логического анализатора**).
- Осциллографы смешанных сигналов (MSO) сочетают характеристики осциллографов с цифровым люминофором (DPO) с базовыми функциями 16-канального логического анализатора, включая возможность декодирования протокола параллельных/последовательных шин и запуска по сигналам этих шин. **Цифровые каналы MSO, подобно любой логической схеме, видят цифровой сигнал, как последовательность высоких и низких логических уровней.** Это значит, что пока звон, выбросы и скачки напряжения питания не вызывают логических переходов, эти аналоговые эффекты в MSO не учитываются и на экране их не видно.
- Подобно логическому анализатору, для определения высокого или низкого логического уровня сигнала **MSO использует пороговое напряжение**. MSO очень удобен для быстрой отладки цифровых схем, предлагая разнообразные функции запуска, регистрацию с высоким разрешением и средства анализа. Одновременный анализ аналоговых и цифровых сигналов, позволяет быстро выявлять основные причины многих проблем, превращая MSO в идеальный прибор для проверки и отладки цифровых схем.





## Виртуальные осциллографы



Виртуальный осциллограф  
VDS2062

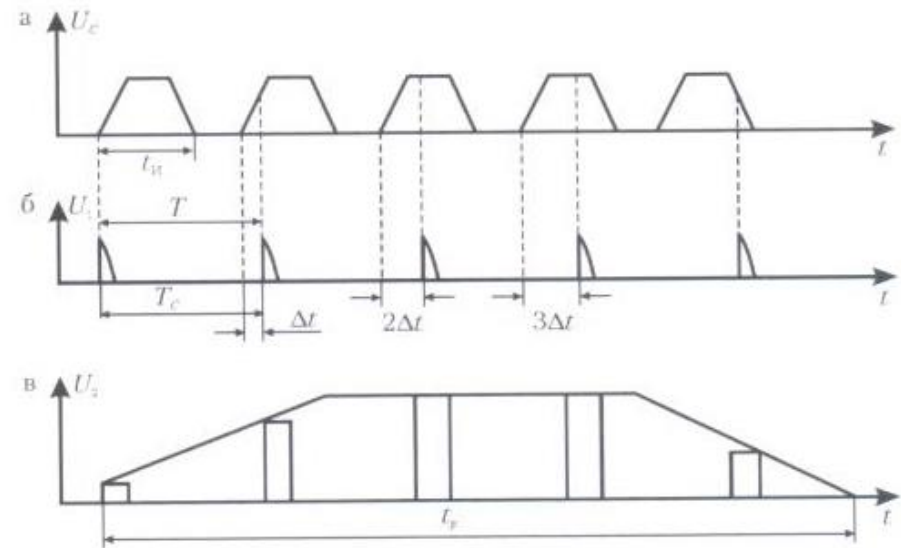
- Могут быть как внешним прибором с USB или параллельным портом ввода-вывода данных, так и внутренним дополнительным прибором на основе PCI или ISA карт. Программное обеспечение любого виртуального осциллографа дает возможность полного управления прибором, а также предоставляет ряд сервисных возможностей, например, экспорт-импорт данных, математическая обработка сигналов, расширенные измерения, цифровая фильтрация и т.д.

Различные серии осциллографов на базе ПК могут использоваться для очень широкого спектра измерений, как в различных областях радиоэлектроники, так и в смежных областях жизнедеятельности человека. Они обладают очень высокими эксплуатационными характеристиками и являются альтернативой традиционным ЦЗО.



# Цифровые стробоскопические осциллографы

- Такие ЦО строят трансформированное по времени (растянутое) изображение на основе отсчетов из разных периодов исследуемого сигнала (со сдвигом отсчетов от периода к периоду на величину одного шага  $\Delta t$ ).
- Полученное изображение, представляющее собой огибающую выбранных отсчётов входного сигнала, повторяет его форму. Но длительность преобразованного сигнала во много раз превышает длительность исследуемого сигнала, т.е. происходит сжатие его спектра, что эквивалентно расширению полосы пропускания осциллографа.
- Самый крупный недостаток любых стробоскопических осциллографов: они могут отображать только периодические сигналы с множеством повторяющихся периодов, но не могут исследовать однократные и редко повторяющиеся процессы.



# Применение ЦО для амплитудных и временных измерений

- **Амплитудные измерения** – это измерение таких амплитудных параметров входного сигнала, как максимальное значение, минимальное значение, постоянная составляющая периодического сигнала, пиковые отклонения вверх и вниз, выбросы, среднеквадратическое значение и другие.
- **Временные измерения** предназначены для измерений таких временных параметров сигнала, как частота, период, длительность импульсного сигнала по заданному уровню, фазовые сдвиги, время нарастания и спада и другие.
- **Кроме того, современные ЦО могут измерять некоторые параметры, производные от амплитуды и времени**, например: площадь сигнала или площадь сигнала в квадрате (что применительно к импульсному сигналу определяет его энергию); осуществлять безразмерные виды измерений, например: подсчет числа целых периодов сигнала в заданном интервале времени, числа точек дискретизации на всем экране или на заданном участке сигнала, числа пиков на гистограмме и так далее.
- **В ЦО так же имеются специализированные виды измерений**, предназначенные для измерения параметров специфических устройств или режимов, например, – параметров мощности электрического сигнала, параметров систем последовательной передачи данных, параметров дисковых или оптических приводов, джиттера и другие. Все эти специальные виды измерений базируются на результатах измерения амплитудных и временных параметров сигнала.

## **Погрешности измерения амплитудных параметров сигналов с помощью ЦО**

- Погрешность измерения амплитудных параметров определяется тем, что в большинстве современных ЦО используются 8-битные АЦП, что дает теоретическую относительную погрешность измерения, равную  $1/2^8 \approx 0,4 \%$ .
- С учетом нелинейности входных усилителей, нелинейности АЦП, температурного дрейфа, погрешности коэффициента усиления входных усилителей и т.д., погрешность измерения постоянного напряжения составляет порядка 3 %. Это достаточно большое значение погрешности измерения, так как обычно цифровые вольтметры обеспечивают погрешность измерения постоянного напряжения менее 0,1 %.
- Погрешность ЦО при дифференциальных измерениях напряжения (амплитуды) переменных сигналов составляет величину порядка 1,5 %. Но если принять во внимание, что диапазон линейности АЧХ большинства современных ЦО составляет порядка 0,7 от значения полосы пропускания (достигающей десятков ГГц) то даже на частотах около 1 ГГц цифровые осциллографы составляют конкуренцию вольтметрам переменного тока или измерителями мощности, имеющим погрешность порядка 3 %.
- Кроме того, осциллографы способны производить измерения среднеквадратического значения напряжения сигнала любой формы, а обычные высокочастотные вольтметры переменного тока – только сигнала синусоидальной формы (т.к. чаще всего они используют пиковые детекторы).

## ***Погрешности измерения временных параметров сигналов с помощью ЦО***

- Измерения временных параметров с помощью ЦО – это очень точные автоматические измерения очень большого набора параметров.
- Цифровые осциллографы обеспечивают относительную погрешность измерения этих параметров порядка  $10^{-5}$  (т.е. 10 ppm) или 0,001 % и менее (в то время, как лучшие экземпляры аналоговых осциллографов имеют погрешность измерения всего 1,5 %).
- Абсолютная погрешность измерения временных параметров ( $\Delta T$ ) цифрового осциллографа может быть выражена формулой:
$$\Delta T = \pm(T_{\text{оп}} + 1/F_{\text{д}} + T_{\text{дж}})$$
  - где  $T_{\text{оп}}$  – погрешность установки частоты опорного генератора;  $F_{\text{д}}$  – частота дискретизации;  $T_{\text{дж}}$  – собственный джиттер осциллографа.
- Современные технологии электронных элементов дают возможность применения в осциллографах опорных генераторов с погрешностью установки менее  $10^{-6}$  (т.е. 0,0001 %) в год, что при частоте генератора 1 МГц даёт величину нестабильности в 1 пс, а при частоте 1 ГГц – в 1000 раз меньше.

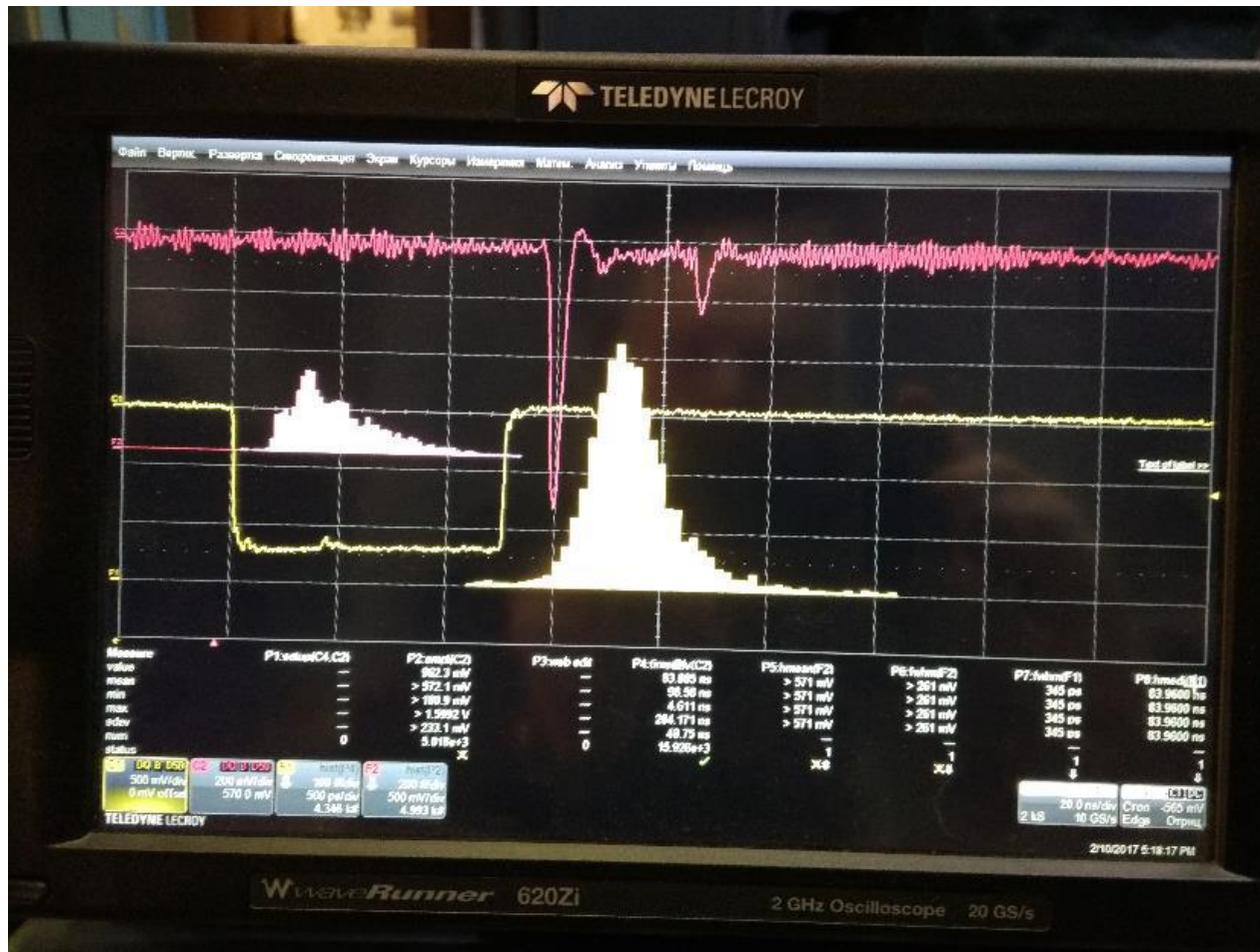
## Пост-обработка результатов измерения

Цифровые осциллографы способны хранить большой массив данных (отсчётов). Этот массив данных можно представлять в графическом виде, обрабатывать методами математической статистики и выводить результаты статистической обработки, сохранять в виде файлов данных для экспорта в другие программные приложения операционной среды Windows. Все это дает пользователю большие дополнительные возможности по анализу сигнала.

*ЦО имеют возможность формирования из массива данных разных графиков – графика слежения, тренда, гистограммы и др.*

- **График слежения** представляет собой функцию, в которой горизонтальная ось (ось X) представляет собой временную ось, полностью совпадающую с временной осью развертки, а по оси Y (вертикальной оси) располагаются значения результата измерения заданного параметра. В результате этого получается временной график изменений выбранного параметра в пределах одной развертки осциллографа.
- **Тренд** – это график, представляющий собой функцию, в которой горизонтальная ось (ось X) представляет ось номера измерения – 1, 2, 3, 4,...n, (эта ось не связана с временной осью развертки осциллографа), а по оси Y (вертикальной оси) располагаются значения результата измерения выбранного параметра.
- **Гистограмма**. С точки зрения графического изображения гистограмма – это график в виде столбиков, высота которых пропорциональна степени повторяемости данных из большого массива, попавших в указанные диапазоны значений. В случае ЦО массивом выступает массив данных измерения выбранного параметра.
- ЦО в роли **анализатора спектра**: вычисление спектров сигналов по алгоритму дискретного преобразования Фурье (чаще всего – быстрого).

**Пример дисплея ЦО с результатами измерений:  
осциллограммы, гистограммы амплитудного и временного  
распределения**





# List of Standard Measurements-1

## (таблицы из WaveRunner 6 Zi/HRO Oscilloscopes Operator's Manual)

Measurement	Description
Amplitude (amp)	Measures the difference between upper and lower levels in two-level signals. Differs from pkpk in that noise, overshoot, undershoot, and ringing do not affect the measurement. Amplitude is calculated by using the formula Top - Base. On signals not having two major levels (such as triangle or saw-tooth waves), the amplitude parameter returns the same value as peak-to-peak.
Area	Integral of data. Computes area of the waveform relative to zero level. Values > zero contribute positively to the area; values < zero, negatively.
Base	Lower of two most probable states (higher is top). Measures lower level in two-level signals. Differs from min in that noise, overshoot, undershoot, and ringing do not affect measurement. On signals not having two major levels (such as triangle or saw-tooth waves), the amplitude parameter returns the same value as minimum.
Bit Rate	Bit rate of serial data stream.
Cycles (cycles)	Determines number of cycles of a periodic waveform lying between cursors. First cycle begins at first transition after the left cursor. Transition may be positive- or negative-going.
Delay	Time from trigger to transition: Measures time between trigger and first 50% crossing of specified signal. Delay can be used to measure the propagation delay between two signals by triggering on one and determining delay of other.
Delta Delay (ddelay)	Computes time between 50% level of two sources.
Dperiod@level (dper@lv)	Adjacent cycle deviation (cycle-to-cycle jitter) of the period measurement for each cycle in a waveform. The reference level for this measurement can be specified.
Dtime@level (dt@lv)	Computes the time between transitions of the selected sources at the specified levels. Only positive going transitions are counted.
Dtrig Time (dtrig)	Time from last trigger to this trigger
Duration (dur)	For single sweep waveforms, dur is 0; for sequence waveforms: time from first to last segment's trigger; for single segments of sequence waveforms: time from previous segment's to current segment's trigger; for waveforms produced by a history function: time from first to last accumulated waveform's trigger.
Duty Cycle	Percent of period for which data are above or below the 50% level of the signal.
Duty@level (duty@lv)	Percent of period for which data are above or below a specified level.
Dwidth@level	Difference (delta) between adjacent widths above or below a specified level.
Edge@level (edge@lv)	Number of positive edges in waveform that cross the specified threshold level.
Edge to Edge	Delta time between some edge on the first source to some (other) edge on a second source.
Fall 80-20% (fall8020)	Duration of pulse waveform's falling transition from 80% to 20% of the amplitude averaged for all falling transitions between the measurement gates. On signals not having two major levels (triangle or saw-tooth waves, for example), top and base can default to maximum and minimum, giving less predictable results.

Measurement	Description															
Fall time (fall)	Duration of pulse waveform's falling transition from 90% to 10% of the amplitude averaged for all falling transitions between the measurement gates. On signals not having two major levels (triangle or saw-tooth waves, for example), top and base can default to maximum and minimum, giving less predictable results.															
Fall@level (fall@lv)	<p>Fall at level: Duration of pulse waveform's falling edges between user-specified transition levels.</p> <table><tr><th>Thresh</th><th>Ramda</th><th>Lower Unit</th><th>Upper Unit</th><th>Default</th></tr><tr><td>Lower</td><td>Low</td><td>1%</td><td>45%</td><td>15%</td></tr><tr><td>Upper</td><td>High</td><td>55%</td><td>95%</td><td>85%</td></tr></table> <p>Threshold arguments specify two vertical values on each edge used to compute fall time: lower = lower thresh. x amp/100 + base upper = upper thresh. x amp/100 + base</p>	Thresh	Ramda	Lower Unit	Upper Unit	Default	Lower	Low	1%	45%	15%	Upper	High	55%	95%	85%
Thresh	Ramda	Lower Unit	Upper Unit	Default												
Lower	Low	1%	45%	15%												
Upper	High	55%	95%	85%												
First	Indicates value of horizontal axis at left cursor.															
Frequency (freq)	Period of cyclic signal measured as time between every other pair of 50% crossings. Starting with first transition after left measurement gate. The period is measured for each transition pair. The reciprocal of each period measurement is calculated as the frequency.															
Freq@level (freq@lv)	Period of cyclic signal measured as time between every other pair at the specified level. Starting with first transition after left measurement gate. The period is measured for each transition pair. The reciprocal of each period measurement is calculated as the frequency.															
FWHM	Measures the width of the largest area histogram peak at half of the population of the highest peak.															
FWxx	Measures the width of the largest area histogram peak at xx% of the population of the highest peak.															
Half Period (hper)	Half period of a waveform.															
Hist ampl (hamp)	Difference in value between the two most populated peaks in a histogram.															
Hist base	Value of the left-most of the two most populated histogram peaks.															
Hist max pop	Peak with maximum population in a histogram.															
Hist maximum	Value of the highest (right-most) populated bin in a histogram.															
Hist mean	Average or mean value of data in a histogram.															
Hist median	Value of the 'x' axis of a histogram that divides the population into two equal halves.															
Hist minimum	Value of the lowest (left-most) populated bin in a histogram.															
Hist mode	Position of the highest histogram peak.															
Hist pop@x	Population at bin for specified horizontal coordinate.															
Hist range	Calculates range (max-min) of a histogram.															
Hist rms	Root mean square of the values in a histogram.															
Hist sdev	Standard deviation of values in a histogram.															
Hist top	Value of the right-most of the two most populated histogram peaks.															
Hist X@peak	Value of the nth highest histogram peak. You supply the value of n.															
Hold Time	Time from the clock edge to the data edge.															
Last	Time from trigger to last (rightmost) cursor.															

# List of Standard Measurements-2

## (таблицы из WaveRunner 6 Zi/HRO Oscilloscopes Operator's Manual)

Measurement	Description
Level@X (lvl@x)	Gives the vertical value at the specified x position. If the x position is between two points, it gives the interpolated value. When the Nearest point checkbox is selected, it gives the vertical value of the nearest data point.
MATLAB param	Custom MATLAB function that produces a measurement. Requires XDEV option to edit functions through the oscilloscope GUI using MATLAB Script.
Maximum (max)	Measures highest point in waveform. Unlike top, does not assume waveform has two levels.
Mean	Average of data for time domain waveform. Computed as centroid of distribution for a histogram of the data values.
Median	The average of base and top values.
Minimum (min)	Measures the lowest point in a waveform. Unlike base, does not assume waveform has two levels.
N-cycle Jitter	Peak-to-peak jitter between edges spaced n UI apart.
NBPhase	Provides measurement of the narrow band phase at a specific frequency of the waveform.
NBPower	Provides measurement of the narrow band power at a specific frequency of the waveform.
None	Disables parameter calculation
Num Points (npoints)	Number of points in the waveform between the measurement gates.
Overshoot-	Amount of overshoot following a falling edge. This is represented as percentage of amplitude. Overshoot- is calculated using the formula (base - min.)/ampl x 100. On signals not having two major levels (triangle or saw-tooth waves, for example), may not give predictable results.
Overshoot+	Amount of overshoot following a rising edge specified This is represented as a percentage of amplitude. Overshoot+ is calculated using the formula (max. - top)/ampl x 100. On signals not having two major levels (triangle or saw-tooth waves, for example), may not give predictable results.
Peak to Peak (pkpk)	Difference between highest and lowest points in waveform. Unlike ampl, does not assume the waveform has two levels. Peak to peak is calculated using the formula <i>maximum - minimum</i> .
Peaks	Number of peaks in a histogram.
Percentile (pctl)	Horizontal data value that divides a histogram so the population to the left is xx% of the total.
Period	The time between every other pair of 50% crossings. Starting with first transition after left measurement gate, period is measured for each transition pair, with values averaged to give final result.
Period@level (per@lv)	The time between every other pair of at the level specified. Starting with first transition after left measurement gate, period is measured for each transition pair, with values averaged to give final result.
Phase	Phase difference between signal analyzed and signal used as reference. Both signals are measured from the 50% point of their rising edges.
Rise 20-80% (rise2080)	Duration of pulse waveform's rising transition from 20% to 80% of the amplitude averaged for all rising transitions between the measurement gates. On signals not having two major levels (triangle or saw-tooth waves, for example), top and base can default to maximum and minimum, giving less predictable results.

Measurement	Description
Rise Time	Duration of pulse waveform's rising transition from 10% to 90% of the amplitude averaged for all rising transitions between the measurement gates. On signals not having two major levels (triangle or saw-tooth waves, for example), top and base can default to maximum and minimum, giving less predictable results.
Rise@level (rise@lv)	Duration of pulse waveform's rising edges between user-defined transition levels. Threshold arguments specify two vertical values on each edge used to compute rise time: lower = lower thresh. x amp/100 + base upper = upper thresh. x amp/100 + base
RMS	Root Mean Square of data (between gates) calculated using the formula: $\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (v_i)^2}$ Where: v <sub>i</sub> denotes measured sample values, and N = number of data points within the periods found up to maximum of 100 periods.
Setup	Time from the data edge to the clock edge.
Skew	Time of Clock2 edge (nearest to Clock1) minus time of Clock1 edge. "Clock" refers to specified edge and level of any two sources, data signals included.
Slew Rate (slew)	Slew rate or local dV/dt in a transition zone
Std Dev (sdev)	Standard deviation of the data between the measure gates using the formula: $\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (v_i - mean)^2}$ Where: v <sub>i</sub> denotes measured sample values, and N = number of data points within the periods found up to maximum of 100 periods. This is equivalent to the rms for a zero-mean waveform. Also referred to as AC RMS
TIE@level (tie@lv)	Difference between the measured times of crossing a given slope and level and the ideal expected time. For Slope you can choose positive, negative, or both. For output units you can choose time or unit interval (UI). A unit interval equals one clock period. The Virtual Clock setup gives you a choice of Standard (1.544 MHz) or Custom reference clocks. You can also use a mathematically derived Golden PLL to filter low frequency jitter. The cutoff frequency is user selectable.
Time@level (time@lv)	Time from trigger (t=0) to crossing at a specified level.
Top	Higher of two most probable states (base is lower). Measures higher level in two-level signals. Differs from max in that noise, overshoot, undershoot, and ringing do not affect measurement. On signals not having two major levels (such as triangle or saw-tooth waves), the amplitude parameter returns the same value as minimum.
Total Pop (totp)	Total population of a histogram.
Width	Width of cyclic signal determined by examining 50% crossings in data input. If first transition after left cursor is a rising edge, waveform is considered to consist of positive pulses and width the time between adjacent rising and falling edges. Conversely, if falling edge, pulses are considered negative and width the time between adjacent falling and rising edges. For both cases, widths of all waveform pulses are averaged for the final result.
Width@level (wid@lv)	Width measured at a user-specified level.
WidthN (widen)	Time of cyclic signal determined by examining 50% crossings in data input. The widthN is measured from falling edge to rising edge.



# **List of the math standard Operators-1**

*(таблицы из WaveRunner 6 Zi/HRO Oscilloscopes Operator's Manual)*

Operator	Definition
Absolute	For every point in the waveform the distance away from zero is calculated. For values greater than zero this is the same as the value. For values less than zero, the magnitude of this value without regard to its sign is used.
Average	Calculates either a summed or continuous average of a selected number of sweeps. See <a href="#">Averaging Waveforms</a> . The maximum number of sweeps is determined by the oscilloscope model and memory.
Copy	Copies waveform in its unprocessed state to the first available memory location.
Correlation	Calculates a measure of similarity of two waveforms, or a waveform against itself, as a function of a time-lag applied to one of them.
Derivative	Calculates the derivative of adjacent samples using the formula: (next sample value – current sample value) / (horizontal sample interval)
Deskew	Shifts trace in time the amount of the deskew factor.
Difference	For every point in the waveform, the value of Source2 is subtracted from the value of Source1. Source1 and Source2 must have the same horizontal units and scale and the same vertical units.
Envelope	Calculates highest and lowest vertical values of a waveform at each horizontal value for a specified number of sweeps.
ERes	Applies a noise reduction and smoothing filter by adding a specified number of bits. See <a href="#">Enhanced Resolution</a> .
Exp	Calculates the antilog to the base e of the source; that is, e raised to the power equal to the source.
Exp10	Same as Exp, using base 10.
FFT	Computes a frequency spectrum with optional Rectangular, Von Hann, Flat Topp, Hamming, Blackman-Harris, and Hanning windows. Calculates up to 128 Mpts. Also allows FFT Averaging through use of a second math operator. See <a href="#">FFT</a> .
Floor	Calculates the lowest vertical values of a waveform at each horizontal value for a specified number of sweeps.
Histogram	Plots the number of data points that fall into statistically significant intervals or bins. Bar height relates to the frequency at which data points fall into each interval/bin.
Integral	Calculates the linearly rescaled integral (with multiplier and adder) of a waveform input starting from the left edge of the screen using the formula: (current sample value + next sample value) * (horizontal sample interval) Each calculated area is summed with the previous sum of areas. The multiplier and adder are applied before the integration function.
Interpolate	Inserts points between sampled points (upsamples) according to one of three algorithms: Linear (straight line), Sinx/x (curved), and Cubic (spine). Interpolation factor of 2 to 50 determines number of points in the upsample.
Invert	For every point in the waveform, the inverse of that point is calculated.

## *List of the math standard Operators-2*

(таблицы из WaveRunner 6 Zi/HRO Oscilloscopes Operator's Manual)

Operator	Definition
Ln	Performs a natural log of a waveform. Values less than or equal to zero are set to underflow.
Log10	Performs a log base 10 of a waveform. Values less than or equal to zero are set to underflow.
MatLab math	Produces a waveform using a custom MatLab function. Requires XDEV option to edit functions through the oscilloscope GUI using MatLab Script.
Phistogram	Creates a histogram based on the displayed pixels of a persistence map falling within a user-defined vertical and/or horizontal box (slice). The source trace must have Persistence turned "on."
Product	For every point in the waveform, the value of Source1 is multiplied by the value of Source 2. Source1 and Source2 must have the same horizontal units and scale.
Ptrace mean	Plots the mean value of each sample point in a persistence map. The source trace must have Persistence turned "on."
Ptrace range	Generates a waveform with a width derived from the population range of a persistence map. The source trace must have Persistence turned "on."
Ptrace sigma	Generates a waveform with a width derived from the sigma (sum) of a persistence map. The source trace must have Persistence turned "on."
Ratio	For every point in the waveform, the value of Source1 is divided by the value of Source2. Source1 and Source2 must have the same horizontal units and scale.
Reciprocal	For every point in the waveform the inverse is calculated using the formula: $1 / (\text{sample value})$
Rescale	For every point in the waveform the sample value is multiplied by the specified multiplier and then add to with the specified adder. See <a href="#">Rescaling and Assigning Units</a> .
Roof	Calculates the highest vertical values of a waveform at each horizontal value for a specified number of sweeps.
Segment	Selects one segment from a source waveform to place in a sequence waveform. Used in Sequence sampling mode.
Sinx/x	Performs 10-to-1 interpolation using a $\text{Sin}(x)/x$ filter.
Sparse	"Thins," or decimates, an incoming acquisition by dropping sample points at regular intervals. Sparsing factor specifies the number of points to drop between retained samples (e.g., factor of 4 retains 1 then drops 4). Sparsing offset specifies the point at which to begin applying the sparsing factor (e.g., offset of 3 begins count on the third sample (3), then drops the number of samples specified by the sparsing factor (4).
Square	For every point in the waveform, the square of the sample value is calculated.
Square Root	For every point in the waveform, the square root of the sample value is calculated.
Sum	For every point in the waveform, the value of Source1 is added to the value of Source 2. Source1 and Source2 must have the same horizontal units and scale and the same vertical units.
Track	Generates a waveform composed of parameter measurements that is time synchronous with the source waveform. The vertical units are those of the source parameter value and the horizontal units are seconds. Parameter values are posted at the sampling rate.
Trend	Produces a waveform composed of a series of parameter measurements in the order the measurements were taken. The vertical units are those of the source parameter, the horizontal unit is measurement number. The trend contains a single value for each measurement.
Zoom	Produces a magnified trace of a selected portion of the input waveform. See <a href="#">Zooming Traces</a> .

## Синхронизация (запуск) осциллографа

- Синхронизация (запуск) осциллографа определяет момент времени, в который осциллограф начинает захват сигнала.
- Основная концепция функции запуска осциллографа заключается в том, что часть входящего сигнала подается в схему сравнения. Когда напряжение сигнала достигает заранее заданного состояния запуска (например, пересекает пороговый уровень), начинается сбор данных.
- При использовании цифрового запуска то же самое выполняется после аналого-цифрового преобразователя на уже оцифрованных данных. Это позволяет добиться очень малого джиттера точки запуска и дает возможность выполнения запуска во всей полосе пропускания осциллографа. При этом доступны дополнительные возможности управления запуском, такие как регулируемый гистерезис запуска.
- Расширенные функции запуска помогают найти нужную информацию. Запуск по заданным условиям позволяет выделить определенный участок осциллограммы и обнаружить аномалии. Функции запуска можно настроить на специальные условия во входном сигнале, облегчая, например, обнаружение импульсов, длительность которых меньше заданной

## *Le Croy: модели серии WaveRunner 6 Zi*



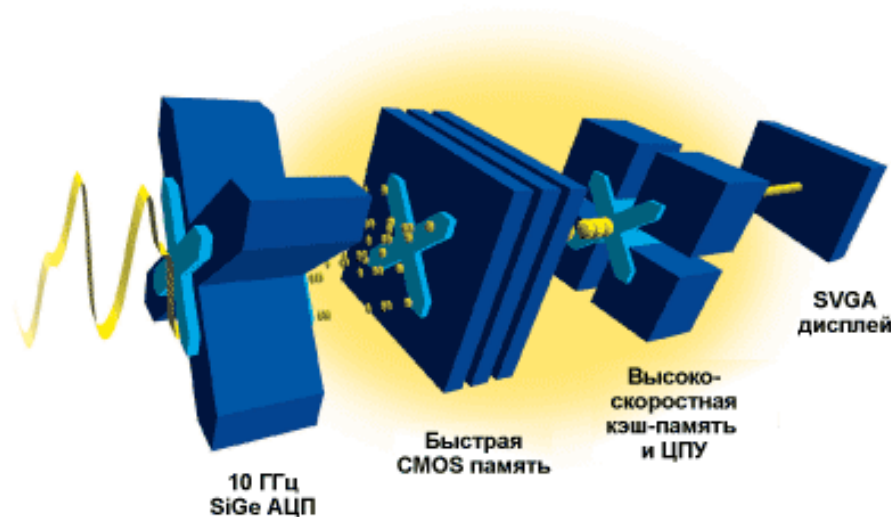
- Память – 16 Мб на каждый канал (32 Мб в режиме объединения 2 каналов) с возможностью опционального увеличения длины записи до 64 Мб на канал (128 Мб в режиме объединения каналов),
- Частота дискретизации увеличена до 40 Гвыб/с (для осциллографов с полосой пропускания 1 ГГц и выше).
- Использование операционной среды Windows 7 и потоковой архитектуры X-Stream II позволило получить быстрый отклик осциллографа на манипуляции органов управления.
- Большой выбор пробников и аксессуаров, расширенный инструментарий анализа сигналов систем последовательной передачи данных

## *LeCroy WaveRunner 6Zi:*

### *Высокая скорость измерения и обработки потоковой архитектуры X-Stream II*

- Технология X-Stream является уникальной разработкой компании LeCroy и используется во всех моделях осциллографов, выпускаемых данной компанией.
- Архитектура X-Stream II использует сегменты осциллограмм переменной длины для повышения эффективности кэш-память процессора. Традиционные цифровые осциллографы, которые отображают полноразмерные осциллограммы за один проход сбора данных, вынуждены платить за это снижением производительности обусловленной чрезмерно упрощённой архитектурой без задействования всех ресурсов центрального процессора. Как результат – это в 10–100 раз более быстрая обработка данных и повышение быстродействия в целом. Таким образом, осциллограф WaveRunner является более быстрым при обработке больших массивов записей, полученных при максимальной памяти, по сравнению с другими осциллографами.
- Возможности архитектуры X-Stream II преумножаются использованием процессора Intel® Dual Core™, высокоскоростной внутренней шиной передачи данных PCIe x 4, 64-разрядной ОС Windows7™ и увеличенной до 4 Гб оперативной памятью.

## LeCroy: обработки потоковой архитектуры X-Stream II



Краеугольный камень архитектуры продуктов LeCroy – применение SiGe-технологий в техническом моделировании, что позволяет достичь в осциллографах рекордных скоростей аналогово-цифровых операций.

Технология основана на том, что входной сигнал поступает на кремний-германиевый АЦП (выполненный на основе гетеропереходов, дающих самое высокое быстродействие транзисторов) и оцифровывается в реальном времени с частотой до 10 Гвыб/с. Затем сигнал разбивается на пакеты и хранится в быстрой КМОП-памяти тракта оцифровки.

По двум высокоскоростным каналам сигнал из памяти передается в ЦП (центральный процессор), который производит необходимую математическую обработку сигнала и вывод его на дисплей.

# Передняя панель WaveRunner LeCroy WaveRunner 640Zi



Большинство элементов управления на передней панели дублируют функции, доступные через сенсорный экран. Все ручки на передней панели работают как при их вращении, так и при нажатии их как на кнопку. Кнопки на передней панели загораются, указывая, какие трассы и функции активны. Действия, выполняемые из передняя панель всегда применяется к активной кривой.



## LeCroy WaveRunner 6Zi

### Новый способ навигации - управляющее поле **WavePilot**



**WavePilot** обеспечивает быстрый доступ к режимам курсорных измерений, декодирования, WaveScan™, журналу предыстории, LabNotebook™ и анализатора спектра, благодаря наличию горячих клавиш на передней панели осциллографа.

Многофункциональный регулятор в виде джойстика (**SuperKnob**) находящийся в центре управляющего поля WavePilot позволяет легко перемещаться по таблице, управлять масштабированием и позиционированием осциллограммы, а так же быстро документировать и комментировать все производимые настройки.



## *Le Croy WaveRunner 6 Zi :*

### *Приложение Lab Notebook («Моя записная книжка»)*

**Lab Notebook** обеспечивает возможность создавать и сохранять отчеты, документировать результаты работы; сохранение всех отображаемых осциллограмм и настроек осциллографа, избавляя от необходимости использовать отдельные меню для записи всех этих файлов по отдельности.



## LeCroy WaveRunner 6Zi

### Расширенные возможности синхронизации

- Комбинация широкой полосы пропускания и 10 различных интеллектуальных видов синхронизации, четырёх каскадных видов синхронизации, запуска развёртки по результатам измерений и режим **Triggerscan** – всё это стандартный набор средств, позволяющих быстро обнаружить проблему, чтобы сфокусироваться на причине её возникновения.
- Новый режим синхронизации - запуск развёртки по результатам измерений является мощной функцией регистрации события, основанный на определённом измерении выбранного параметра с большим разрешением.
- Высокоскоростной запуск по данным последовательных шин позволяет осуществлять запуск по последовательностям на скорости передачи до 3 Гбит/с на длине 80 бит. Полный спектр последовательных протоколов включает: I2C, SPI, UART, RS-232, Audio (I2S, LJ, RJ, TDM), CAN, LIN, FlexRay, MIL-STD-1553, SATA, PCIe, 8b/10b, USB2 и многие другие.
- Осциллографы WaveRunner 6Zi поддерживают протокол стандарта LXI класса C и обеспечивают работу со всеми другими совместимыми аксессуарами LeCroy, в том числе логическими пробниками MS-32, MS-250 / MS-500, а также установку всех дополнительных программных опций, ранее доступных для моделей WaveRunner (WR Xi-A и WR MXi-A)

## *LeCroy WaveRunner 6Zi:*

### *Функция TriggerScan*

- **TriggerScan** использует высокоскоростную аппаратную возможность схемы синхронизации с послесвечением экрана, чтобы отфильтровать только интересующие сигналы и обеспечить результат поиска до 100 раз быстрее, чем другие методы.
- Традиционные режимы быстрого обновления экрана работают лучше всего над частыми событиями, происходящими в низкочастотном сигнале, в то время как TriggerScan является лучшим средством в обнаружении редких событий в высокочастотном сигнале. В дополнение к аналитическим инструментам общего применения, специализированные решения применяются для проверки систем последовательной передачи данных, разработки встроенных систем, цифровых систем, автомобильных приложений. Эти опции расширяют измерительные и аналитические возможности стандартных функций осциллографов LeCroy и дополняют утилиты WaveRunner 6Zi, в соответствии с меняющимися потребностями.

## *LeCroy WaveRunner 6Zi*

### *Специализированные инструменты*

- Только осциллографы LeCroy полностью интегрирует сторонние программы в поток обработки осциллографа, позволяя создать новые измерения или математические алгоритмы непосредственно в осциллографической оболочке и вывести результат на экран осциллографа в реальном времени.
- Используются такие инструменты, как C/C++, MATLAB,<sup>®</sup> Excel, Jscript (JAVA), и Visual Basic чтобы создавать собственные специализированные математические и измерительные функции или другие алгоритмы управления.

## *LeCroy WaveRunner 6Zi:*

### *Режим предыстории*

- Режим предыстории позволяет прокручивать назад события, чтобы обнаружить аномалии, измерить их параметры, и быстро найти источник существующей проблемы.
- Режим предыстории всегда сохраняет форму сигнала, без какого-либо вмешательства оператора. Единственное, что Вам требуется - это только вызывать средство просмотра.

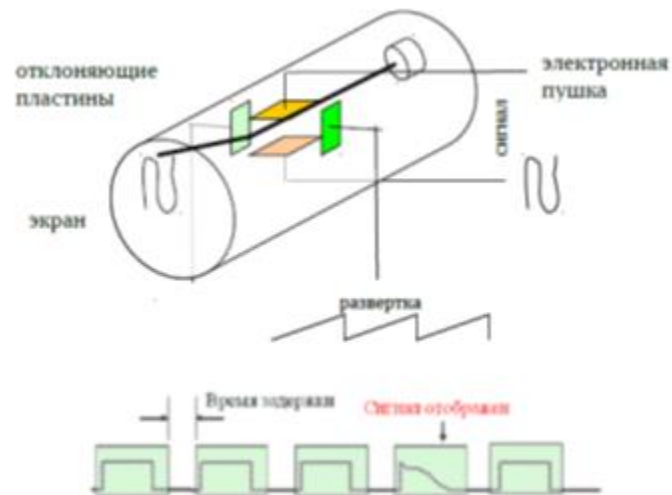
## *Литература*

1. Гаврилов Л.Е. Основы ядерной электроники. Ч.1: Учебное пособие. М.: НИЯУ МИФИ, 2010. – 164 с.
2. Терешков В.В., Цветков Ф.А., Лабынцев А.В. Цифровые осциллографы: теоретические основы применения: Учебное пособие / Под ред. В.В. Терешкова. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2013. – 84 с.
3. Полное руководство оператора WaveRunner 6 Zi/HRO Oscilloscopes Operator's Manual. © 2017 Teledyne LeCroy, Inc. All rights reserved.  
<http://cdn.teledynelecroy.com/files/manuals/waverunner-6zi-operators-manual.pdf>
4. Тюрин В.А. Метод прямого цифрового синтеза в генераторах сигналов специальной формы SFG-2110 и АКИП-3410/3: учебно-методическое пособие/ В.А. Тюрин. - Казань: Казанский федеральный университет, 2015. - 74 с.  
[https://kpfu.ru/staff\\_files/F233095282/30.08.15\\_Tjurin\\_Metod\\_pryamogo\\_cifrovogo\\_sinteza....pdf](https://kpfu.ru/staff_files/F233095282/30.08.15_Tjurin_Metod_pryamogo_cifrovogo_sinteza....pdf))

***Back up slides***



## Аналоговый осциллограф с ЭЛТ (ЭЛО)



## Принцип действия осциллографа

Осциллографы используются для исследования периодических сигналов различной формы и амплитуды. Принцип работы традиционного аналогового осциллографа показан на рисунке 1а. На пластины горизонтального отклонения от специального генератора подается напряжение развертки, изменяющееся по пилообразному закону. По мере нарастания пилообразного сигнала луч на экране ЭЛТ перемещается слева направо, прочерчивая горизонтальную ось – ось времени. В то же самое время на пластины вертикального отклонения действует исследуемый сигнал, поэтому траектория луча в точности соответствует этому сигналу.

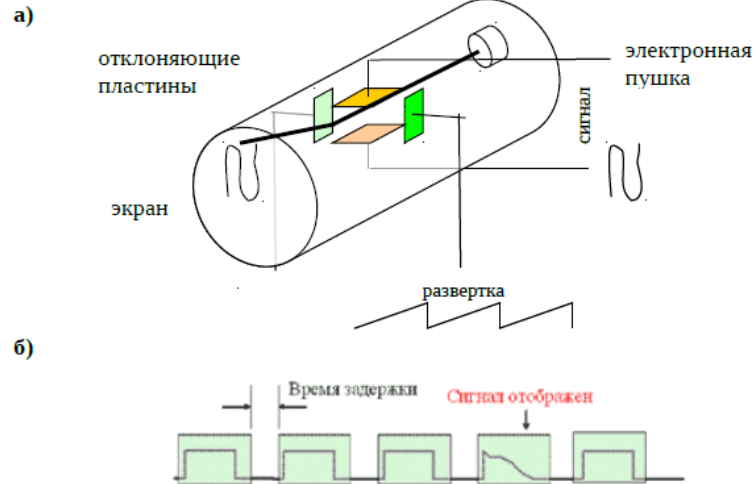
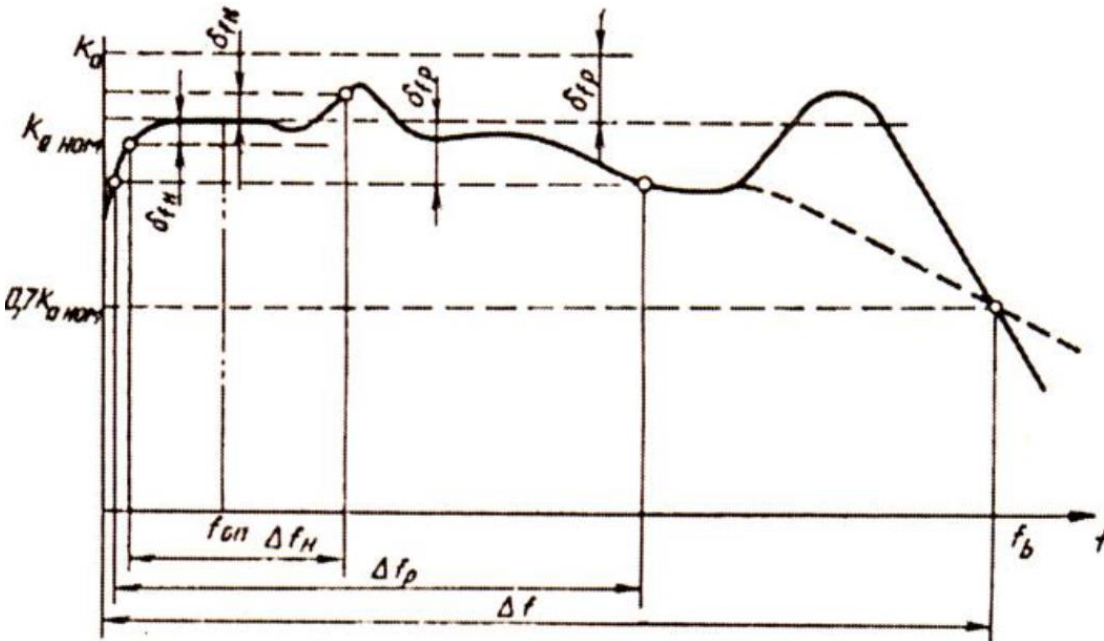


Рисунок 1 - Принцип работы аналогового осциллографа

## Полоса пропускания ЦО, Гц... ГГц



$f_{\text{оп}}$  – опорная частота;

$\Delta f_H$  – нормальный диапазон, в котором неравномерность АЧХ не превышает погрешности коэффициента отклонения (обычно равного 2-4 %);

$\Delta f_p$  – расширенный диапазон, в котором неравномерность АЧХ не превышает 10 %;

$\Delta f$  – полоса пропускания, которая определяется как частота, на которой коэффициент передачи  $K_0$  уменьшается на 3 дБ (т.е. в 1,41 раза или до уровня  $\approx 0,7$ ) относительно номинального значения  $K_{0\text{ ном}}$  этого коэффициента

Полоса пропускания для однократных сигналов применяется только для непериодических (или однократных) сигналов, которые захватываются и оцифровываются осциллографом за один запуск. В этом случае полоса для однократных сигналов зависит от частоты дискретизации данного цифрового осциллографа.

Полоса пропускания для повторяющихся сигналов у ЦО гораздо более высокая, чем та, которую, казалось бы, может обеспечить их частота дискретизации. Но если сигнал повторяющийся, то осциллографу не обязательно оцифровывать весь сигнал за один запуск. ЦО может воспроизвести такой сигнал за несколько запусков, каждый раз захватывая и отображая на экране только часть сигнала. (Поэтому полоса пропускания повторяющихся сигналов не зависит от частоты дискретизации; это – характеристика аналоговых усилителей цифрового осциллографа).

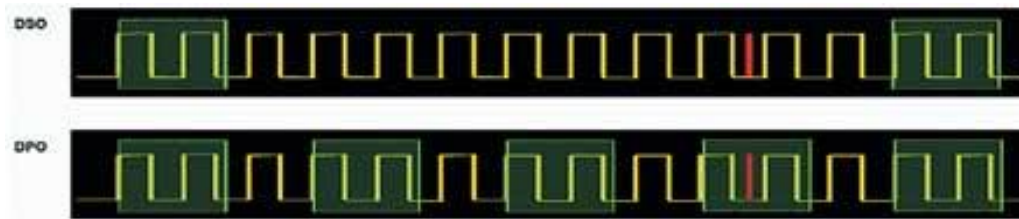
## ***Частота (скорость) захвата сигнала***

- Это число запусков на оцифровку в единицу времени. В результате одного такого запуска появляется выборка из ряда отсчётов; размер выборки задаётся, как правило, самим пользователем с учётом имеющегося объёма памяти осциллографа, установленной частоты дискретизации, а также требуемого коэффициента развёртки на экране ЦО.
- Она ограничена, в основном, инерционностью электронных схем запуска, временем работы АЦП и инерционностью процессов передачи цифровых отсчётов из АЦП в память ЦО.
- Значение частоты захвата может достигать миллиона запусков в секунду и зависит от схемотехники осциллографа; от используемой длины памяти; от метода сбора информации и ее вывода на экран; от режимов измерений и математики, используемых в текущий момент сбора информации, и от других факторов.
- Осциллограмма на экране может быть получена из одной выборки, но обычно она образуется из нескольких выборок. Это обусловлено тем, что при построении осциллограмм в ЦО наиболее часто используется режим наложения (персистенции) выборок и изменяемой интенсивности свечения линий (технология цифрового люминофора). Кроме того, в таком случае в несколько раз уменьшается частота передачи осциллограмм на экран ЦО, что значительно облегчает требования к быстродействию устройств обмена информацией.

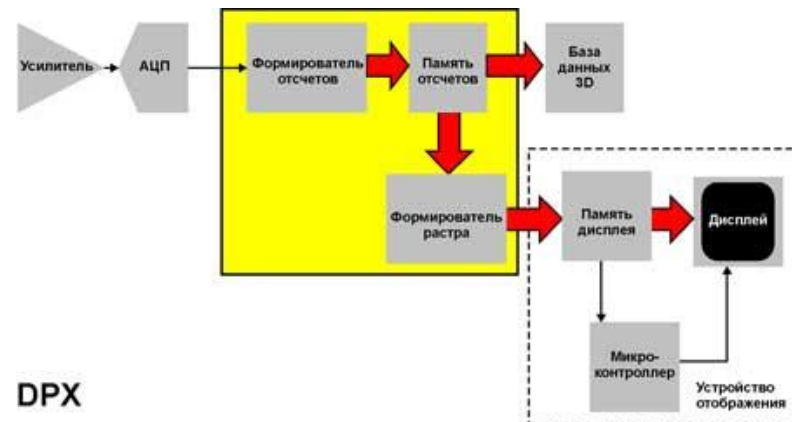
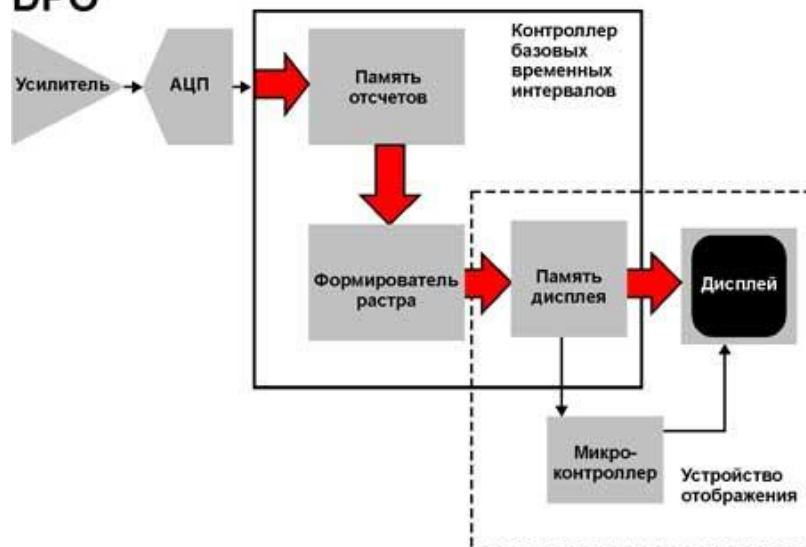
## Частота (скорость) обновления экрана (отображения сигналов на экране)

- Частота (скорость) обновления экрана (отображения сигналов на экране) – это число выведений осциллограмм на экран ЦО в единицу времени.
- Цифровые осциллографы сначала должны оцифровать входной сигнал (произвести ряд отсчётов), затем обработать полученные цифровые данные (накопить, перевести в растровую структуру) и, наконец, воспроизвести осциллограмму на экране.
- Частота обновления экрана отражает быстродействие цифровых процессоров и видеокарты дисплея; пропускную способность каналов по обмену цифровой информацией в ЦО; конструкцию экрана и материалы, используемых в нём.
- Частота обновления экрана обычно значительно меньше частоты захвата сигнала. Поэтому, чтобы не потерять полезную информацию, на экран нужно выводить осциллограммы, полученные в режиме наложения или с использованием пик-детекции.
- Компания Tektronix пошла другим путем. Проблему потери информации о сигнале или уменьшения времени "слепоты" осциллографа была призвана решить технология "InstaVu™". Основной идеей этой технологии стало увеличение скорости захвата входного сигнала или уменьшение интервала времени между соседними запусками. Это достигается за счет применения параллельной (многопроцессорной) архитектуры. При этом один процессор, подключенный к многомерной памяти для отсчетов, управлял только сбором информации, другой же — видеосистемой. Этот шаг позволил довести скорость захвата сигнала (частоту запуска) осциллографа до примерно 100.000 в секунду против нескольких тысяч (обычно, 2000...3000) у однопроцессорного ЦЗО.

Влияние скорости захвата сигнала на потери информации



## DPO



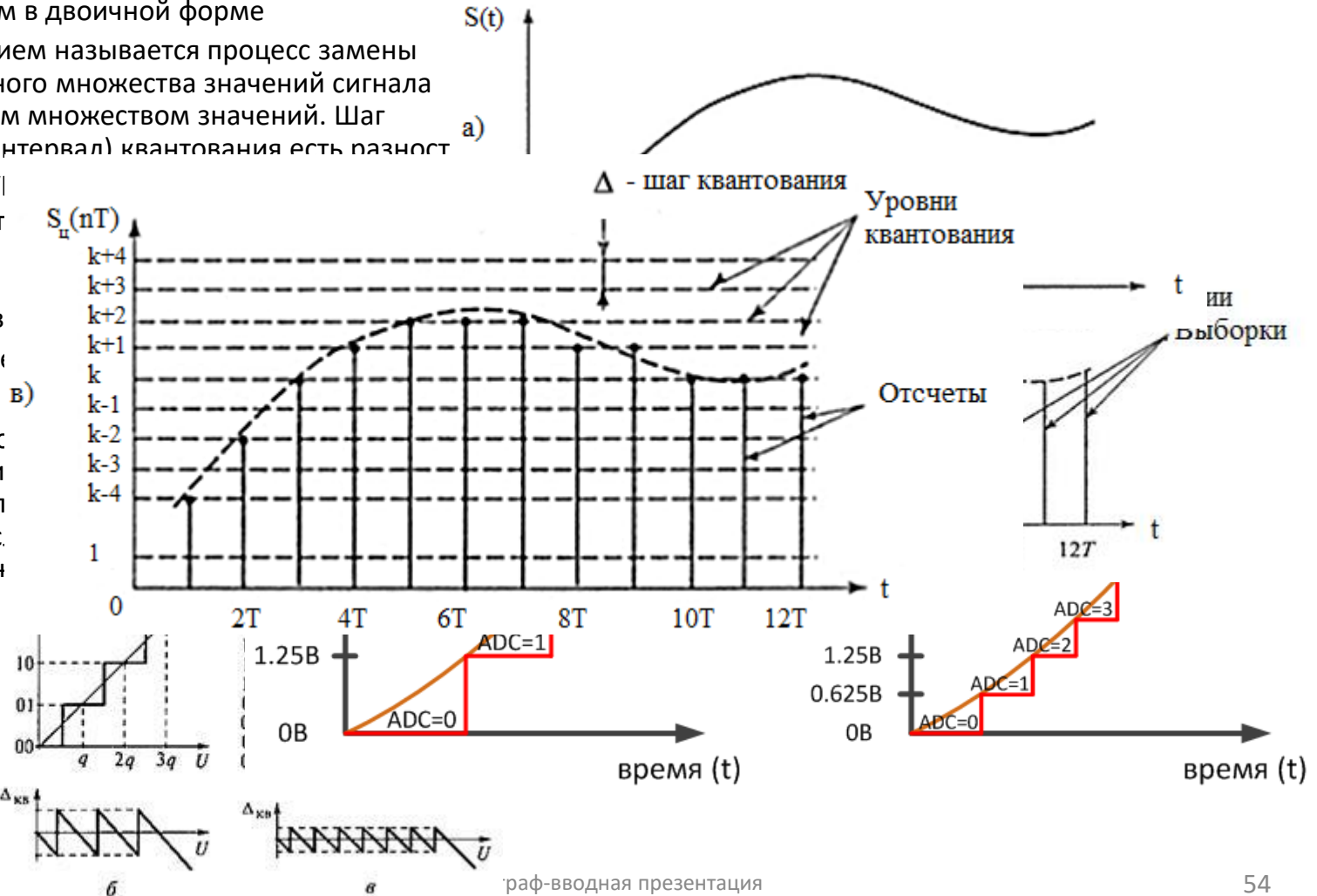
## DPX

# Разрядность АЦП и квантование

- Разрядность АЦП - это число разрядов в числе уровней квантования входного сигнала, записанном в двоичной форме
- Квантованием называется процесс замены непрерывного множества значений сигнала дискретным множеством значений. Шаг (ступень, интервал) квантования есть разность соседних  $y_i$

- При аналог амплитуда разрядное уровней кв
- Число ступи

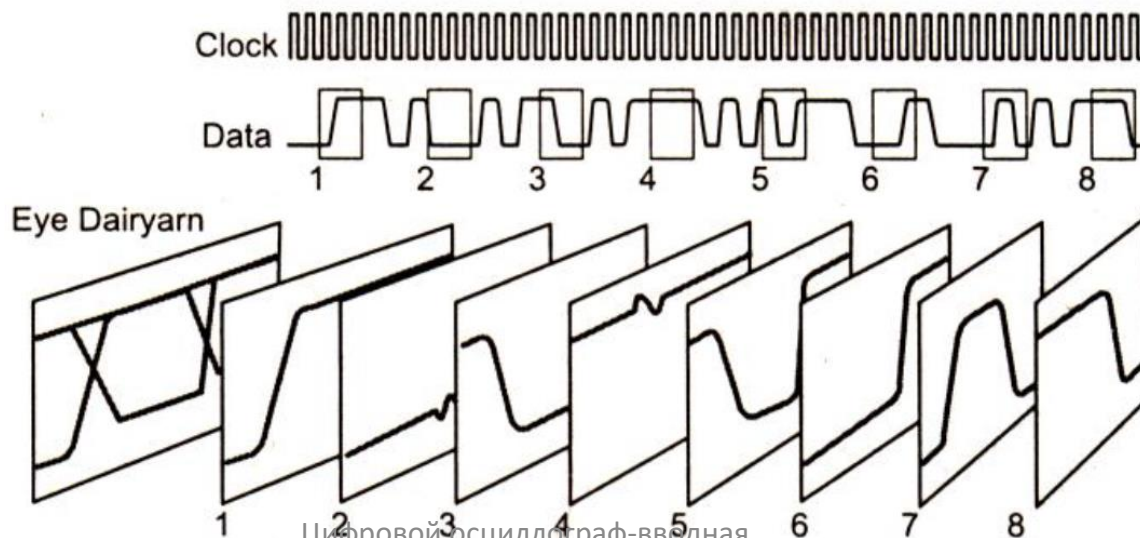
- Пример. Дс уровней си он может п 0,04 В, а ес то мы смох





## Получение глазковых диаграмм

- При разработке, исследовании и техническом обслуживании телекоммуникационного оборудования возникает необходимость фиксировать и измерять осциллографом параметры неидеальных прямо-угольных импульсов и сигналов, имеющих вид перепадов. При этом такие сигналы обычно имеют характерную нестабильность – джиттер, т.е. быстрые флуктуации (от англ. jitter – дрожание). обычно предусмотрены специальные средства для подобных измерений. Наиболее распространенное из таких средств – глазковая диаграмма. Принцип ее построения иллюстрируется рис. 2.9.
- Для построения глазковой диаграммы из сигнального потока выделяются все перепады и все короткие импульсы, имеющиеся в сигнале. Выхваченные при этом «кадры» оцифровываются с высокой частотой дискретизации, а затем осциллограммы этих «кадров» накладываются друг на друга с применением режима персистенции.
- Но для высокочастотных сигналов невозможно выделение и оцифровка всех возможных перепадов и импульсов в реальном масштабе времени, поэтому этот процесс занимает значительное время, в течение которого перепады и импульсы выделяются и оцифровываются в случайном порядке.



# ***Подключение осциллографа к источникам сигналов: специальным генераторам и исследуемым электронным устройствам***

**Подключение осциллографа к специальному генератору** (низкой или высокой частоты, функциональному и т. д.), как правило, осуществляется с помощью специальных кабелей.

При этом нужно соблюдать следующие правила:

- - использовать только кабели, гарантированно предназначенные для данного осциллографа;
- - применять кабели со стандартным волновым сопротивлением (в осциллографической технике – 50 Ом, а в телевизионной – 75 Ом);
- - использовать специальные переходники, например – переход-ник с входным сопротивлением 75 Ом и выходом 50 Ом для подклю-чения к осциллографу 75-омных выводов телевизионных сигналов;
- - применять наиболее короткие кабели из имеющихся;
- - в канале Y и в канале запуска-синхронизации развертки использовать кабели одинаковой длины для выравнивания временных задержек сигналов: исследуемого и запуска;
- - если есть возможность, до подключения откалибровать осциллограф с кабелем с помощью генератора тестовых прямоугольных импульсов с малым временем нарастания и спада.

**Подключение осциллографа к исследуемым электронным устройствам** (например – к выводам интегральных микросхем) обычно осуществляется с помощью стандартного осциллографического пробника.

- «Земляной» зажим пробника с «крокодилем» следует подклю-чать к общему проводу на схеме как можно ближе к элементу, сигналы на выводах которого нужно исследовать.