

# ОСЦИЛЛОГРАФЫ КОМПАНИИ ROHDE & SCHWARZ: ПРЕИМУЩЕСТВА ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ ЗАПУСКА

М.Фрейдхоф, Г.Шульце

Компания Rohde & Schwarz – один из ведущих производителей контрольно-измерительной аппаратуры, в том числе осциллографов. В своих продуктах она использует инновационные решения, позволяющие существенно улучшить их характеристики. Одно из таких решений – система цифрового запуска. Оно применено, в частности, в семействе осциллографов R&S RTO.

Система запуска осциллографа обычно выполняет две функции: обеспечение стабильного отображения сигнала и отображение особых характеристик сигнала (недостигнутые логические уровни (Runt), искажения сигнала, вызванные перекрестными помехами (Glitch), пологие фронты (Rise time), неверная синхронизация между каналами (Data2Clk) и др.). Точность системы запуска и ее гибкость определяют качество отображения и анализа измеряемого сигнала.

Сегодня большинство осциллографов являются цифровыми в том смысле, что измеряемый сигнал дискретизируется и сохраняется

в виде непрерывных серий цифровых значений. Тем не менее, система запуска все еще представляет собой аналоговую цепь, которая обрабатывает исходный измеряемый сигнал. Такая конфигурация имеет ряд недостатков. Чтобы продемонстрировать их, рассмотрим работу цифрового осциллографа с аналоговой системой запуска (рис.1).

Входной усилитель используется для регулировки уровня измеряемого сигнала так, чтобы его амплитуда соответствовала рабочему диапазону АЦП и, соответственно, отображению на осциллографе. Отрегулированный сигнал с выхода усилителя параллельно передается по двум трактам:

на АЦП и в систему запуска. АЦП дискретизирует измеряемый сигнал, и оцифрованные значения отсчетов записываются в память. Система запуска сравнивает сигнал с заданными событиями. При возникновении условия запуска (например, по нарастающему фронту – рис.2) завершается запись отсчетов АЦП, а полученный сигнал обрабатывается и выводится на экран.

Для корректного отображения сигнала на сетке осциллографа необходима точная синхронизация точек запуска по времени.

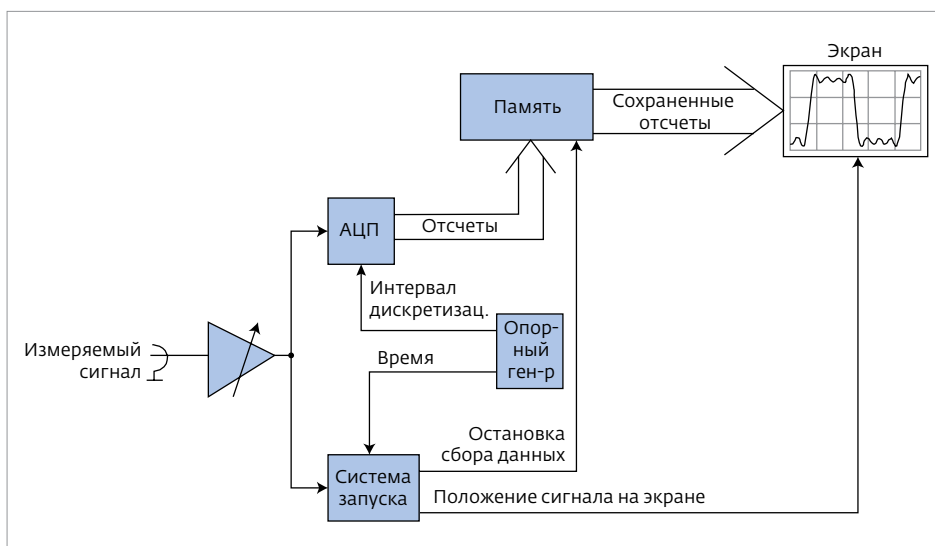


Рис.1. Упрощенная блок-схема цифрового осциллографа с аналоговым блоком запуска



**Рис.2.** Пример измеряемого сигнала с отсчетами АЦП и точкой запуска



**Рис.3.** Пример несоответствия между отображаемым сигналом и фактической точкой запуска

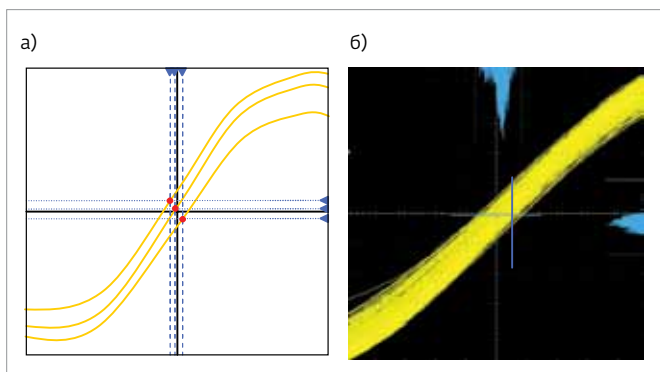
Если оценка времени запуска неточна, то отображаемый сигнал не пересекает точку запуска (точку пересечения уровня запуска и положения запуска) (рис.3).

Неточное положение запуска может быть вызвано несколькими причинами.

- Неточное измерение фронта сигнала запуска. В системе запуска измеряемый сигнал сравнивается с порогом запуска с помощью компаратора. Синхронизация фронта на выходе компаратора должна производиться очень точно. Для этого используется преобразователь "время-цифровой код" (time to digital converter – TDC). Неточность результатов TDC заключается в сдвиге отдельно отображаемых сигналов относительно точки запуска. Случайная составляющая погрешности TDC приводит к изменению

данного сдвига при каждом событии запуска, что выражается в джиттере запуска.

- Систематические погрешности в трактах измеряемого сигнала. Изменяемый сигнал обрабатывается в двух разных трактах – в тракте сбора данных с АЦП и в тракте запуска (см. рис.1). Оба тракта вносят различные линейные и нелинейные искажения, которые приводят к систематическому несовпадению отображаемого сигнала и заданной точки запуска. В худшем случае система запуска может не реагировать на действительные события запуска, хотя они видны на экране, или система реагирует на события запуска, которые не могут быть верно захвачены и отображены в тракте сбора данных.
- Шум в трактах измеряемого сигнала. Два тракта – к АЦП и к аналоговой системе запуска – содержат усилители с различными источниками шумов. Их влияние приводит к задержкам и колебаниям амплитуды, что



**Рис.4.** Джиттер запуска при накоплении нескольких сигналов: а) джиттер проявляется в виде случайных вертикальных и горизонтальных сдвигов относительно идеального положения точки запуска; б) джиттер отображается в виде ширины и высоты наложенных сигнальных кривых

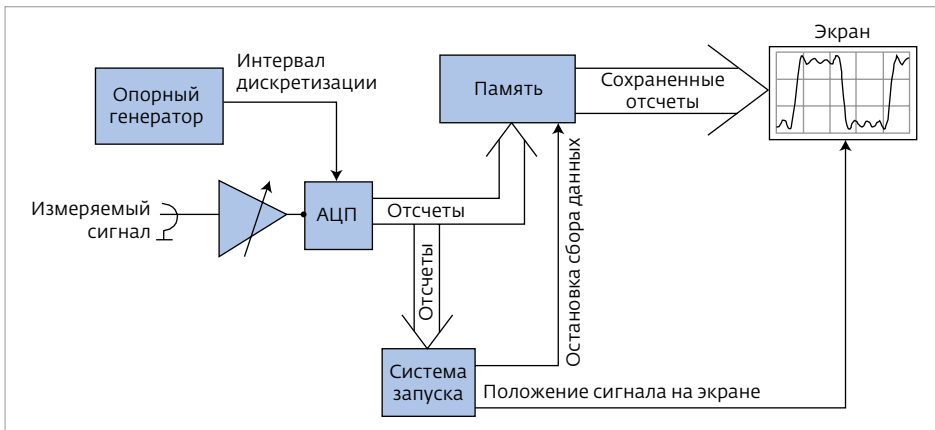


Рис.5. Блок-схема цифрового осциллографа с системой цифрового запуска

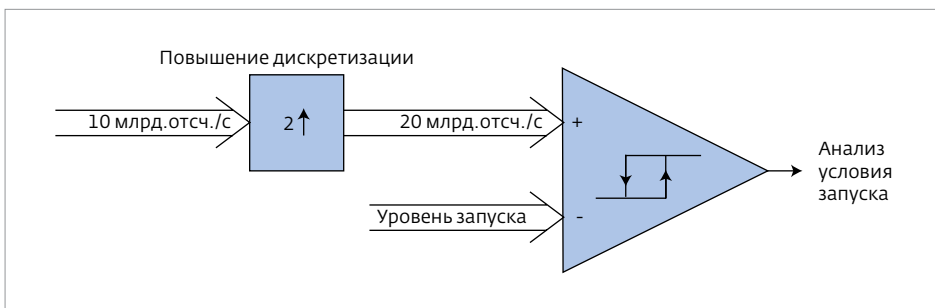


Рис.6. Увеличение частоты дискретизации в цифровой системе запуска с помощью интерполяции

проявляется в виде сдвигов положения запуска (джиттер запуска) на экране осциллографа (рис.4).

Перечисленных погрешностей лишена система запуска, выполненная в цифровом виде (рис.5). В отличие от аналоговой, система

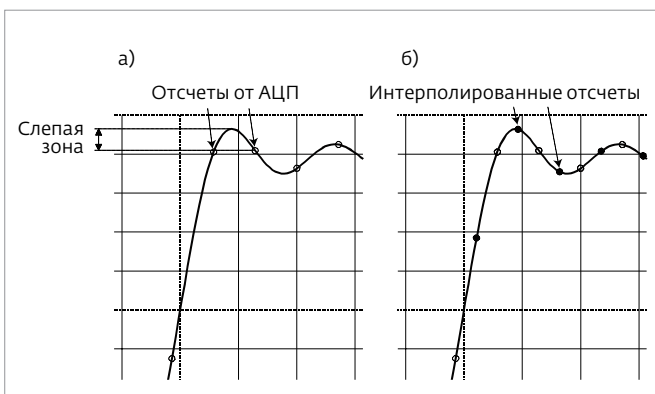


Рис.7. Пример повышения дискретизации для ограничения слепой зоны запуска: а) используются только исходные отсчеты АЦП, б) в дополнение к исходным используются отсчеты, полученные в результате интерполяции

цифрового запуска работает с отсчетами АЦП напрямую. Измеряемый сигнал не разбивается на два тракта.

Таким образом, система цифрового запуска обрабатывает сигнал, идентичный захваченному. Для определения точки запуска используются высокоточные методы цифровой обработки сигналов.

Обработка измеряемого сигнала в реальном масштабе времени – сложная задача. В осциллографах R&S RTO работа цифровой системы запуска базируется на АЦП со скоростью преобразования 10 млрд. отсчетов/с и, таким образом, система должна обеспечивать обработку данных со скоростью 80 Гбит/с (разрядность АЦП – 8 бит).

Необходимо отметить, что поскольку система цифрового запуска использует те же оцифрованные данные, что и устройство сбора данных,

то возможен запуск только по событиям сигнала в пределах диапазона АЦП.

Для выбранного события запуска компаратор, прежде всего, сравнивает измеряемый сигнал

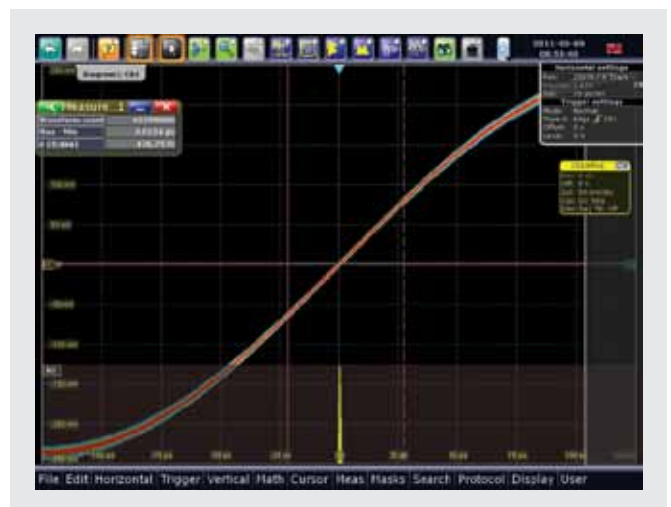


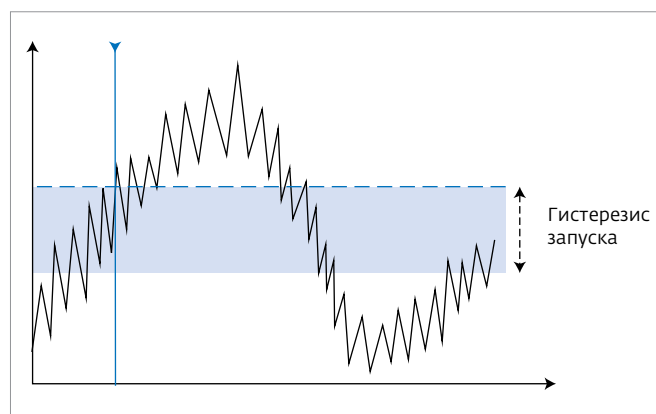
Рис.8. Собственный джиттер запуска, полученный при измерении синусоидального сигнала частотой 2 ГГц и амплитудой (размахом) 500 мВ

с заданным порогом запуска. В простейшем случае, при запуске типа Edge (по фронту), событие запуска обнаруживается при пересечении сигналом порога запуска в заданном направлении (нарастающий или спадающий фронт).

Часто только отсчетов АЦП недостаточно для того, чтобы видеть все детали сигнала (см. рис.2 и 3). Это верно и для цифрового запуска – ориентируясь на отсчеты АЦП, можно пропустить пересечение порога запуска. Поэтому в осциллографах увеличивают частоту дискретизации сигнала с помощью интерполятора (рис.6). Это позволяет обнаружить выброс сигнала и выполнить запуск осциллографа по нему (рис.7).

При использовании системы цифрового запуска получается очень малый джиттер запуска – для осциллографа R&S RTO он ниже 1 пс (средне-квадратичное значение) (рис.8).

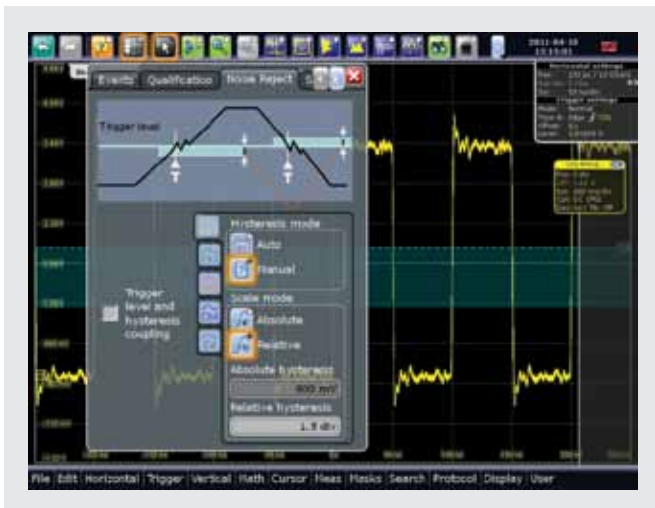
Применение цифровой системы позволяет также гибко настраивать чувствительность запуска. Есть два противоречивых условия, относящихся к чувствительности запуска. С одной стороны, для стабильного запуска по зашумленным



**Рис.9.** Гистерезис уровня запуска обеспечивает стабильный запуск по зашумленным сигналам

сигналам система запуска требует достаточно большого гистерезиса в области порога (рис.9). С другой стороны, широкий гистерезис ограничивает чувствительность системы запуска для сигналов с малой амплитудой.

Цифровая система запуска осциллографа R&S RTO позволяет настраивать гистерезис с целью

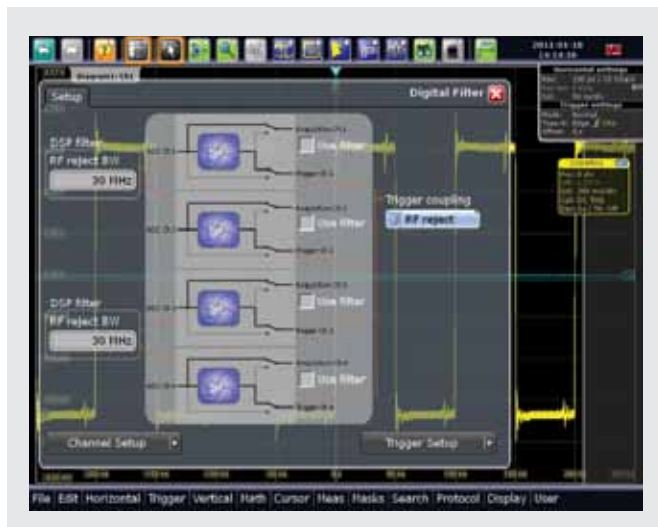


**Рис.10.** Выбор гистерезиса порога запуска. Для наивысшей чувствительности задается нулевой гистерезис

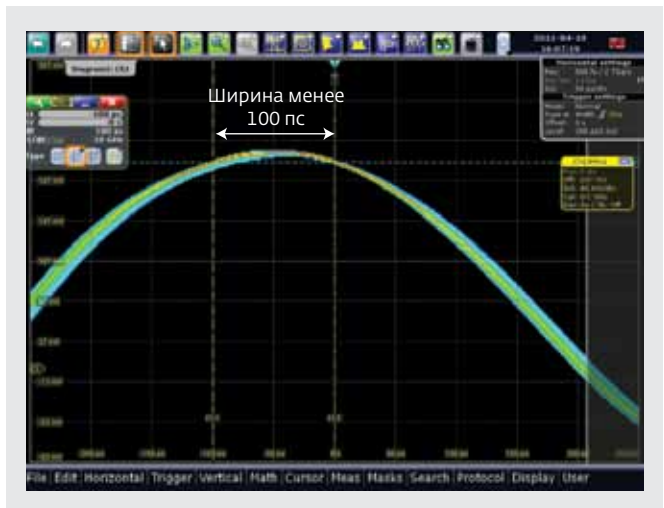
оптимизации чувствительности запуска для соответствующих характеристик сигнала. Доступны несколько вариантов (рис.10):

- автоматический режим (Auto), в котором гистерезис задается встроенным ПО прибора R&S RTO;
- увеличение гистерезиса вручную в режиме Manual для обеспечения стабильного запуска по сигналам с высоким уровнем шума (см. рис.9);
- задание нулевого гистерезиса, чтобы обеспечить наибольшую чувствительность запуска.

Следующий ключевой параметр системы запуска – это минимально обнаружимая длительность (ширина) импульса. Она соответствует самому узкому импульсу, который

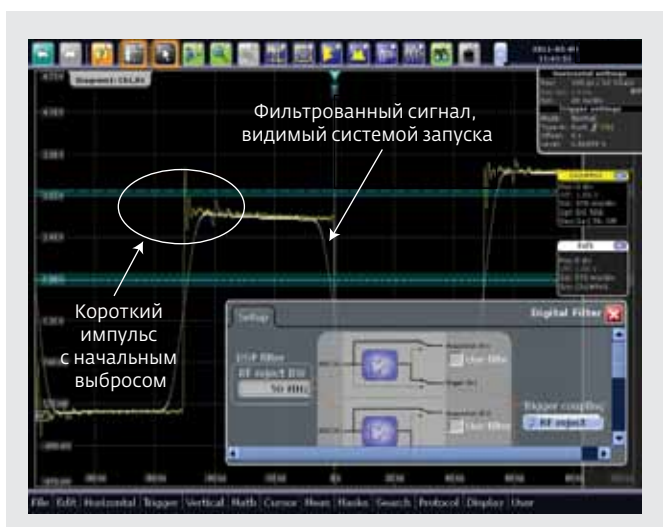


**Рис.12.** Выбор настроек фильтра для сбора данных и сигнала запуска



**Рис.11.** Запуск осциллографа по импульсу длительностью менее 100 пс

осциллограф может обнаружить и произвести запуск. Осциллографы семейства R&S RTO поддерживают стабильный запуск по импульсу, импульсным помехам (глитчу), интервалам и времени нарастания/убывания длительностью вплоть до 100 пс. Запуск по импульсам такой длительности можно продемонстрировать с помощью синусоидальной волны с частотой 1 ГГц и малой амплитудой  $\pm 200$  мВ (рис.11). В синусоидальной волне условия малой длительности импульса выполняются в самой верхней и нижней частях сигнала. В данном примере важно, чтобы гистерезис запуска был установлен равным нулю, так как фронты в верхней



**Рис.13.** Запуск по короткому импульсу (ранту), в котором начальный выброс подавляется НЧ-фильтром

части сигнала очень пологие. На диаграмме можно видеть, что все захваченные сигналы удовлетворяют условию запуска по длительности импульса менее 100 пс.

В системах аналогового запуска требуется некоторое время для "перезарядки" перед новым запуском. В течение этого времени осциллографы не могут реагировать на новые события запуска. В отличие от аналоговой цифровая система запуска осциллографов R&S RTO способна анализировать отдельные события запуска на отрезках 400 пс с разрешением 250 фс. Это важно для приложений со сложными условиями запуска, такими как задержка на определенное число событий, или последовательность запусков, в которой предвзвешенно требуется выполнение нескольких событий.

Еще одно преимущество осциллографов R&S RTO – возможность фильтрации измеряемых сигналов. Специализированные интегральные схемы (ASIC) сбора данных и запуска поддерживают гибкое программирование частоты среза цифрового НЧ-фильтра. Одни и те же настройки

фильтра могут быть использованы для сигнала запуска и измеряемого сигнала (рис.12). Система НЧ-фильтрации подавляет ВЧ-шум в целях запуска и параллельно захватывает и отображает нефильтрованный измеряемый сигнал. В качестве примера можно привести запуск по ранту (короткому импульсу) для захвата импульсов данных, не достигающих уровня логической единицы (рис.13). Настройка порогов запуска по ранту оказывается сложной из-за большого начального выброса, который пересекает окно короткого импульса. Решением является применение НЧ-фильтра только к сигналу запуска. После этого возможен анализ изначального сигнала.

Во многих случаях важна точная синхронизация данных между входными каналами осциллографа. Сдвиги между каналами обусловлены рядом факторов: различные длины кабелей в каналах, щупы, разные положения точек зондирования и др. Выравнивание сигналов по времени обычно выполняется в тракте сбора данных после АЦП, поэтому сдвиг не может быть учтен системой аналогового запуска. Это



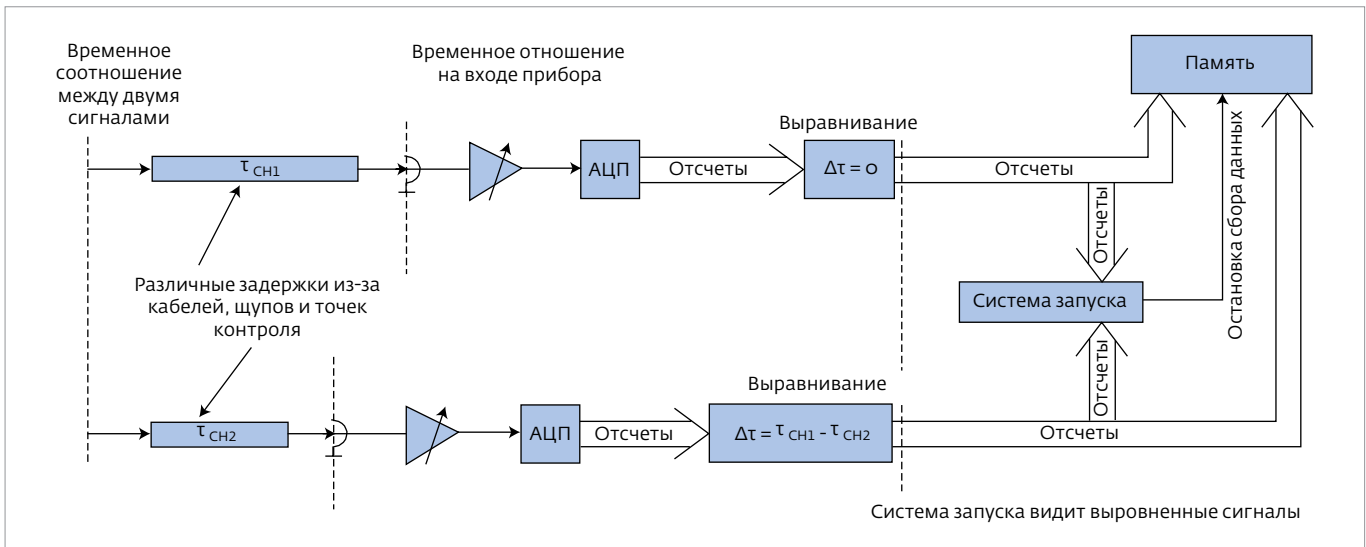


Рис.14. Схема выравнивания по времени сигналов в разных каналах

приводит к отображению на экране неустойчивых сигналов.

В цифровом осциллографе R&S RTO блок сбора данных и блок запуска используют идентичные оцифрованные и обработанные данные (рис.14). Это позволяет точно выровнять сигналы по времени. Цифровые фильтры задержки, используемые в приборе RTO, дают возможность установить выравнивание с точностью 1 пс.

В качестве примера совместных условий запуска по нескольким каналам можно привести запуск по контролю событий (например, Edge) одного канала и конкретным комбинациям уровней (состояние high или low) в других каналах.

Во многих случаях реальная причина ошибки в работе тестируемого устройства не может быть

точно определена, пока не будет просмотрен архив собранных данных о сигналах (осциллограмм). В осциллографах R&S RTO всегда предоставляется доступ к ранее полученным сигналам. Независимо от функции, из которой было остановлено измерение, параметры сигнала, хранящиеся в памяти, сразу же доступны для анализа. К тому же, каждый сигнал имеет индивидуальную метку времени для точного определения момента возникновения события запуска. Таким образом, пользователю доступны исчерпывающие данные для эффективной отладки.

Просмотр архива данных и повторным воспроизведением сигналов управляет специальный инструмент (рис.15). Временные метки могут быть отображены в виде абсолютного времени относительно системного или относительно последнего запущенного сигнала. Разрешение по меткам времени во втором режиме – 1 пс. В приложениях, требующих длительной стабильной синхронизации, очень полезна опция термостатированного опорного генератора (аппаратная опция R&S RTO-B4), которая обеспечивает высокую точность развертки по времени.

Система цифрового запуска в сочетании с такими характеристиками, как широкий динамический диапазон входного каскада, высокая скорость сбора и анализа данных и интуитивно понятный интерфейс превращают осциллограф RTO в мощное средство отладки и анализа.

Богатые функциональные возможности осциллографов WaveAce 1000/2000 делают их оптимальным выбором для многих приложений. ●

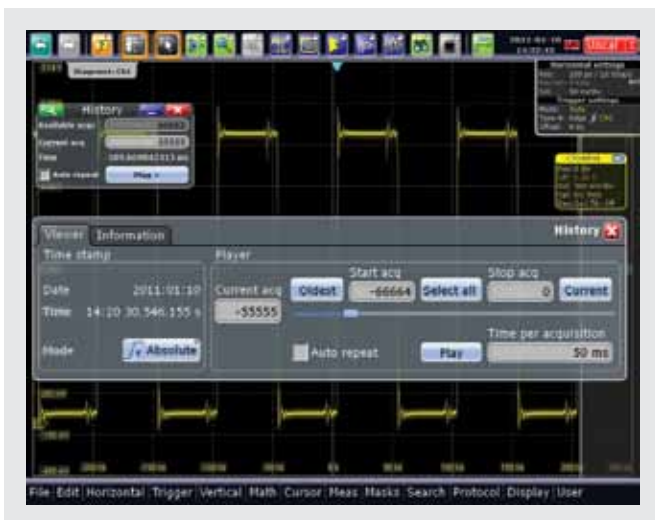


Рис.15. Инструмент просмотра архива