# Осциллографы высокого разрешения Teledyne LeCroy и их возможности

**Владимир Дьяконов (г. Смоленск)**

**Разработка осциллографов высокого разрешения американской корпорацией Teledyne LeCroy (ранее LeCroy) – большой шаг в развитии осциллографии. Фирма LeCroy, один из трёх «китов» мировой индустрии осциллографов, создала уже несколько поколений таких приборов и в ноябре 2013 г. анонсировала новейшие осциллографы смешанных сигналов. Автор благодарит российское отделение Teledyne LeCroy за предоставленные для тестирования образцы приборов, о которых рассказывается в этой статье.**

Современный цифровой осциллограф основан на сборе отсчётов сигналов, оцифрованных с помощью АЦП, их обработке и отображении формы сигналов во временно́й области на экране ЖК-дисплея. Важнейшими параметрами осциллографа являются разрядность дискретизации и частота выборки, которые ограничены возможностями ИС современных АЦП.

Большинство доступных осциллографов имеют полосу частот до 1 ГГц и время нарастания переходной характеристики до 0,35 нс, т.е. они преодолевают не только частотный барьер в 1 ГГц, но и временно́й в 1 нс, и позволяют наблюдать импульсы с длительностью примерно от 1 нс [1–4]. Эти максимальные параметры удалось сохранить в осциллографах класса HDO корпорации Teledyne LeCroy, несмотря на значительное увеличение разрядности его канальных АЦП.

На протяжении четверти века в цифровых осциллографах применялись АЦП с разрядностью 8 бит или $2^8 = 256$ уровнями амплитудного квантования сигналов. Минимальная теоретическая погрешность квантования $1/256 = 0{,}0039$ или $\pm 0{,}00195$ (при расположении осциллограммы между уровнями). На практике её задают равной 1,5...3%. Даже идеальный сигнал при этом отображается как ступенчатый, и это хорошо заметно на экранах цифровых осциллографов. Дальнейшее повышение точности 8-разрядных осциллографов невозможно (за исключением усреднения периодических осциллограмм с потерей скорости их вывода).

Характер возникающих при этом искажений демонстрирует рисунок 1а. Помимо ступенчатости, ограниченная разрядность, или большой шаг квантования, приводит к появлению ошибок в измерении амплитудных параметров и снижению динамического диапазона осциллографов до 48 дБ. Ограниченная разрядность может существенно исказить форму малых сигналов. У новых осциллографов разрядность АЦП увеличена до 12 бит, что снижает амплитуду ступенек в 16 раз в сравнении с 8-битовыми осциллографами и увеличивает общее число уровней квантования с 256 до 4096 (см. рис. 1б). Это резко повышает качество осциллограмм, делая их практически гладкими. Динамический диапазон осциллографов увеличивается до 72 дБ. Погрешность измерений амплитудных параметров у реальных осциллографов снижена втрое (до 0,5%) и имеет резерв к дальнейшему снижению.

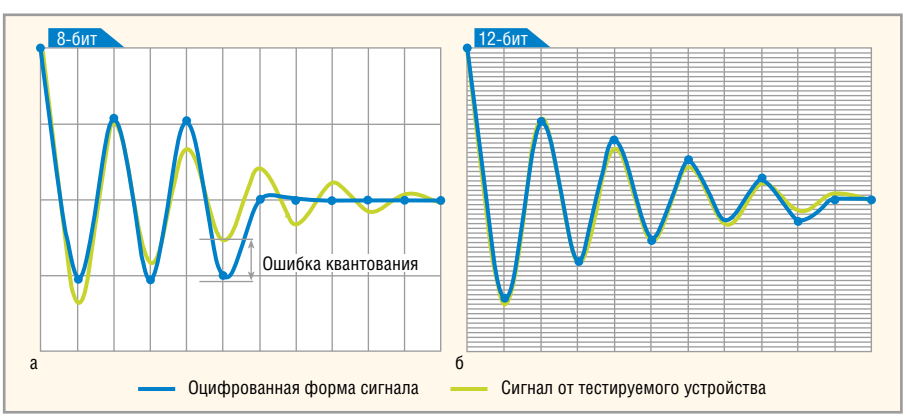


**Рис. 1. Сравнение дискретизации сигнала (затухающая синусоида) с разрядностью 8 и 12 бит**

Первыми 12-битовыми осциллографами высокого разрешения были приборы с открытой архитектурой HRO60Zi и HRO66Zi (см. рис. 2) и уменьшенной до 400 и 600 МГц полосой исследуемых частот, которые были созданы на основе серии WR600Zi. В них впервые был применён крупный (31 см) сенсорный дисплей с высоким (1280 × 800) разрешением. Необычным стало использование поворотного дисплея, который можно оттянуть от корпуса и установить в горизонтальное (см. рис. 3) или вертикальное (см. рис. 4) положение.

Однако приборы HRO66Zi были довольно громоздкими (297 × 418 × × 227 мм), тяжёлыми (около 12 кг) и потребляли большую мощность (600 Вт). На их основе были созданы более совершенные приборы серий HDO4000 и HDO6000 [2] (см. рис. 5). Благодаря двум парам откидывающихся ножек внизу корпуса приборы можно устанавливать строго вертикально или с наклоном вперёд и назад. Габариты приборов составляют 232 × 400 × 131 мм, вес – 5,9 кг. Приборы удобно располагаются даже на малом рабочем месте. Потребляемая от сети мощность снижена до 350 Вт. На задней панели находятся разъём для подключения внешнего дисплея, гнёзда для стереотелефонов и микрофона, порт локальной сети, а также 4 порта USB (ещё 2 на передней панели), к которым можно подключить принтер, клавиатуру, мышь и другие периферийные устройства.

В ноябре 2013 г. Teledyne LeCroy анонсировала выпуск новейших осциллографов смешанных сигналов HDO4000-MS и HDO6000-MS (см. рис. 6). Они оснащены входом для пробника на 16 логических сигналов и одного тактового сигнала; пробник поставляется в комплекте. Максимальная частота логических сигналов составляет 200 МГц.

Изменения внешнего вида в новых приборах носили принципиальный характер – требовалось больше места для крупного экрана и ряда органов управления новыми функциями приборов. В приборах установлен сенсорный дисплей и разработана очень простая и наглядная технология управления таким экраном с помощью палочки стило или прикосновения пальца руки (см. рис. 7).

Передняя панель осциллографов стала меньше (см. рис. 8). Ручки перемещения осциллограмм по вертикали и изменения чувствительности каналов были объединены и действуют только для текущего канала – он включается и выключается соответствующей кнопкой с цветным номером канала (цвет совпадает с цветом осциллограммы канала и светодиодного индикатора). Все поворотные ручки можно нажимать для установки осциллограмм и соответствующих параметров в исходное положение.

Панель управления разделена на 7 зон. Сверху расположена зона с пятью кнопками:

- Auto Setup – автоматическая установка параметров осциллографа, поиск сигналов и установка чувствительности по вертикали;
- Default Setup – установка исходных параметров осциллографа;
- Print – установка параметров печати, сохранения экрана и осциллограмм;
- Touch Screen – включение и выключение сенсорного управления;
- Clear Screens – очистка экрана от лишних элементов.

Ниже расположены зоны:

- Trigger – установка панели синхронизации и режима TriggerScan;
- Horizontal – установка положения осциллограмм по горизонтали и коэффициентов развёртки;
- Vertical – выбор каналов, управление положением осциллограмм по вертикали и установка чувствительности каналов;
- Cursor – вывод курсоров, панели управления курсорами и управление положением курсоров;
- Adjust – управление яркостью.

Наконец, в самом низу панели управления расположена зона с четырьмя кнопками:

- History – включение функции истории (просмотра предшествующих осциллограмм);
- Spectrum – включение функции расширенного анализа спектра;
- WaveScan – включение функции интеллектуального просмотра осциллограмм;
- Decode – включение функции декодирования последовательных шин.

**Рис. 2. Первый осциллограф высокого разрешения LeCroy HRO66Zi**

**Рис. 3. Подготовка к повороту дисплея**

**Рис. 4. Осциллограф LeCroy HRO66Zi с вертикально установленным дисплеем**

**Рис. 5. Внешний вид современного осциллографа Teledyne LeCroy HDO4000/6000**

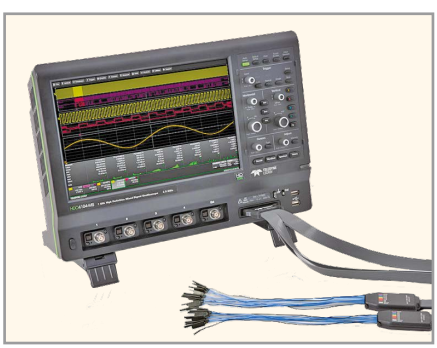

**Рис. 6. Осциллограф смешанных сигналов с пробником логических сигналов**

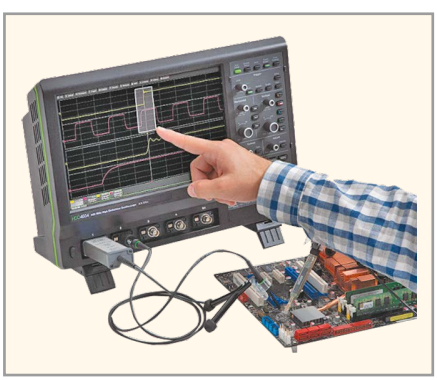

**Рис. 7. Сенсорный экран осциллографа**

Осциллографы имеют широкий диапазон коэффициентов развёртки (от 20 пс/дел до 1000 ч/дел) и развитую систему синхронизации и запуска. Есть система просмотра телевизионных сигналов. В приборах HDO6000 минимальный объём памяти осциллограмм составляет 50 Мбайт/канал и может быть увеличен до 150 и 250 Мбайт.

При первом включении осциллографа рекомендуется установить настройки по умолчанию, нажав кнопку Default Setup. В дальнейшем стоит «забыть» об этой кнопке и использовать её только при серьёзных сбоях в работе осциллографа. Для автоматического масшта-

**Рис. 8. Панель управления осциллографа HDO4000/6000**

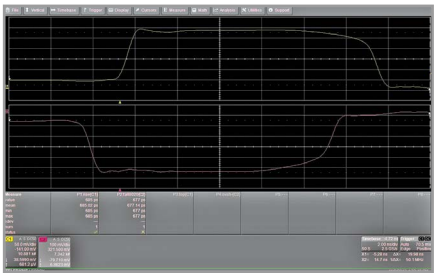

**Рис. 9. Отображение импульсов калибратора осциллографов И1-12**

**Рис. 10. Просмотр сложного телевизионного сигнала и его выделенной части**

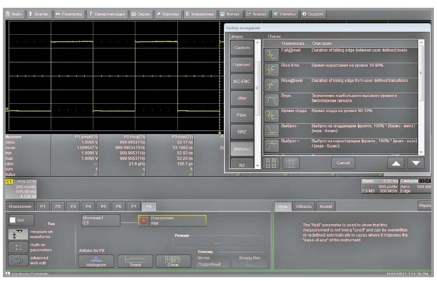

**Рис. 11. Установка автоматических измерений**

**Рис. 12. Осциллограмма импульса sin(x)/x и его автоматических и статистических измерений**

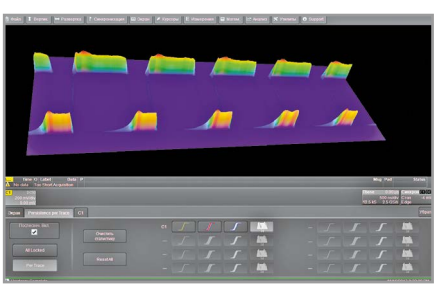

**Рис. 13. Трёхмерное цветное послесвечение**

бирования сигналов используется зелёная кнопка Auto Setup.

Далее рекомендуется провести обычную для осциллографов процедуру калибровки высокоомных пробников, входящих в комплект осциллографа. Они имеют коэффициент деления напряжения 10, входное сопротивление 10 МОм и ёмкость 10 пФ. Настройка точной компенсации пробников осуществляется по сигналам калибратора прямоугольной формы с петель Cal (см. нижний правый угол панели управления прибором) обычным образом.

Для оценки времени нарастания осциллографов применяются специальные внешние калибраторы, формирующие импульсы с очень короткими фронтами. На рисунке 9 показана осциллограмма импульсов калибратора И1-12 с длительностью фронта менее 50 пс на экране 500-МГц осциллографа HDO6504. По результатам автоматического измерения длительности фронтов реальное время нарастания осциллографа близко к теоретическому значению 0,35/полоса, равному 700 пс для 500-МГц осциллографа и 350 пс для 1-ГГц прибора.

При использовании какого-либо режима осциллографа или его функции на экране появляется маленькое окошко – дескриптор (описатель). Два дескриптора C1 и C2 для каналов и два P1 и P2 для автоматических измерений параметров видны под осциллограммами (см. рис. 9). Активация каждого дескриптора открывает панель его параметров. Если дескрипторов много, они принимают упрощённый вид. Фактически, дескрипторы заменяют главное меню, которое можно использовать реже.

Во всех каналах приборов серии HDO полоса не изменяется при переключении чувствительности. В окне параметров каналов можно установить входное сопротивление канала (50 Ом или 1 МОм), тип связи с источником сигналов и полосу частот канала. Есть возможность задать тип интерполяции сигнала (линейная или sin(x)/x) и программное повышение разрешения (ERES) до 15 разрядов.

Иногда удобнее наблюдать обычную осциллограмму и её часть при меньшей по длительности развёртке. Часто такой режим «лупы времени» вводится с помощью дополнительной задержанной развёртки. У осциллографов класса HDO «лупа» включается нажатием кнопки Zoom между панелями Horizontal и Vertical (см. рис. 10), а выделенный участок дополнительно подсвечивается на основной осциллограмме. Развёртка телевизионного сигнала позволяет рассмотреть любую строку заданного полукадра для всех распространённых стандартов телевидения.

Осциллографы серии HDO имеют встроенные средства ослабления высокочастотных помех и шумов посредством сужения полосы частот канала до 200 МГц или даже 20 МГц и программного увеличения разрядности до 15 бит. Все они эквивалентны уменьшению полосы пропускания. Мощным средством повышения чёткости осциллограмм является усреднение. При периодических сигналах оно не ведёт к росту частотных искажений и сужению полосы, но увеличивает время построения итоговой осциллограммы. Число операций усреднения задаётся в панели параметров выбранного канала.

Осциллограф HDO позволяет выполнить ряд измерений осциллограмм. От аналоговых осциллографов унаследована возможность курсорных измерений. Курсоры – это перемещаемые отрезки прямых на экране, положение которых можно точно определить. Есть пары вертикальных и горизонтальных курсоров, последовательно вызываемых на экран и убираемых (одновременно) нажатием кнопки Type (тип курсора). Поворотной ручкой Select можно перемещать выбранный тип курсора. Несмотря на простоту курсорных измерений, они незаменимы для исследования особых точек или нестандартных особенностей осциллограмм, когда автоматические измерения затруднены.

Режим автоматических измерений превращает современный цифровой осциллограф в мощную многофункциональную измерительную и вычислительную систему. Увеличение разрешения осциллографов серии HDO естественно повышает роль автоматических измерений, поэтому их число в осциллографах HDO6000 увеличено более чем вдвое (по сравнению с HDO4000) и достигло 56! На рисунке 11 показаны средства установки автоматических измерений. Процесс сводится к указанию объекта и выбору типа измерения. Каждое измерение имеет свой дескриптор PN, где N – номер автоматического измерения. На экран можно выводить до 8 дескрипторов автоматических измерений: от измерения частоты и периода сигнала, длительности его фронтов до специальных измерений. Статистика измерений может быть отключена. На рисунке 12 приведена осциллограмма импульса sin(x)/x, гистограммы его нестабильности и «живые»

микрогистограммы внутри дескрипторов. На дисплей также выводятся численные результаты автоматических измерений.

Многие осциллограммы имеют нестационарный характер, вызванный случайными процессами и шумами или спецификой порождающих их процессов. Для наблюдения таких осциллограмм удобно вводить режим аналогового послесвечения. Это можно сделать в позиции «Экран» главного меню. Послесвечение в осциллографах HDO можно сделать цветным и даже трёхмерным (см. рис. 13). Оно повышает информативность осциллограмм и позволяет наблюдать их кратковременные особенности.

Осциллографы серии HDO оснащены также новыми режимами работы, например: Waveform History (история формы сигнала), который позволяет автоматически сохранять в памяти осциллограмм ранее просмотренные осциллограммы и при необходимости воспроизводить их в отсутствие входного сигнала. Режим включается кнопкой History внизу панели управления, вызывая панель с «проигрывателем» (см. рис. 14). В левом верхнем углу выводится таблица просмотренных осциллограмм.

Режим Sequence (сегментированная память) позволяет осциллографу HDO разделить захваченный сигнал на сегменты (до 10 000) с удалением ненужных межсегментных промежутков, выделить отдельный сегмент для анализа и сохранения и последовательно воспроизвести все полученные сегменты. Режим даёт возможность сохранить высокую частоту дискретизации при отображении ВЧ-сигналов, уменьшить время простоя (dead time) и произвести измерения временны́х интервалов между редко повторяющимися сигналами.

Новая функция WaveScan (включается аналогичной по названию кнопкой внизу панели управления) предлагает возможности обнаружения редких событий в однократной развёртке или сканирования развития событий по множеству развёрток в течение длительного периода времени. Пользователь может выбрать 20 режимов поиска (фронт положительный или отрицательный, длительность импульса, частота, время нарастания, скважность и т.д.), задать необходимые условия поиска (>, <, в диапазоне, вне диапазона), установить преде-

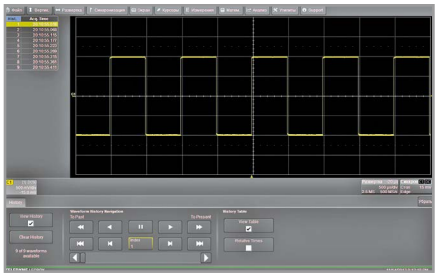

**Рис. 14. Функция History**

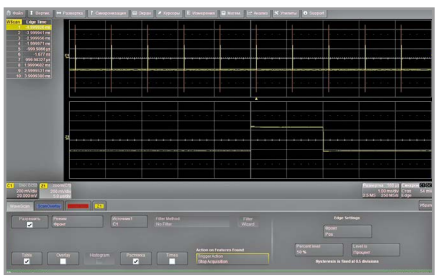

**Рис. 15. Функция WaveScan нашла положительные фронты коротких импульсов**

**Рис. 16. Панель синхронизации и параметров режима TriggerScan**

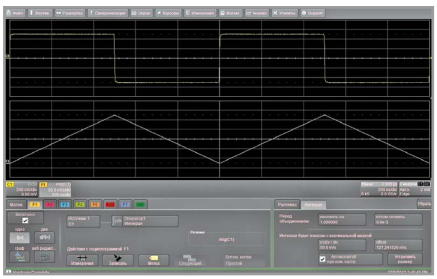

**Рис. 17. Пример операции интегрирования осциллограммы меандра**

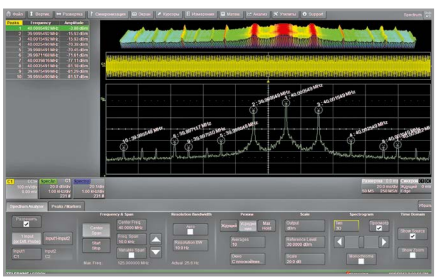

**Рис. 18. Спектральный анализ сигнала с амплитудной модуляцией**

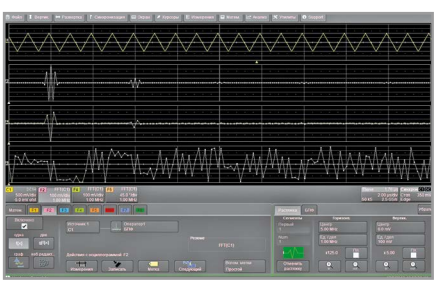

**Рис. 19. Комплексный спектральный анализ треугольного сигнала с применением БПФ**

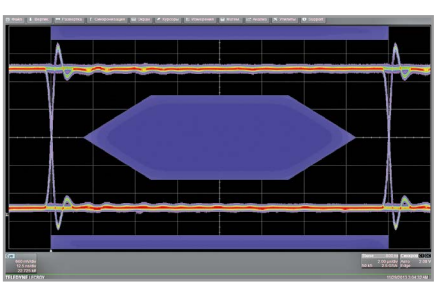

**Рис. 20. Пример построения маски и глазковой диаграммы**

лы допуска и др. После определения режима и условий поиска практически мгновенно активируется поиск артефактов.

В отличие от режимов поиска в осциллографах Tektronix и Agilent, режим WaveScan не дублирует режимы и установки схемы синхронизации и выполняет поиск не только по временны́м параметрам, но и по амплитудным, с индикацией реальных результатов измерений и временны́х отметок их появления. Он позволяет также отбирать редкие события (с минимальными, максимальными значениями или совместно) и задавать число событий.

При однократной развёртке режим WaveScan будет идентифицировать редко повторяющиеся события, выделять их красным цветом и выдавать список в цикле наблюдения событий в виде таблицы (см. рис. 15). После этого пользователь может применить растяжку или дополнительные инструменты анализа для окончательной отладки и настройки отображения.

В дополнение к возможности поиска редких событий по однократной развёртке, WaveScan может находить события в течение часов или даже дней и после обнаружения такого события применять к нему различные функции обработки. Режим WaveScan намного разнообразнее классической реализации обзора осциллограмм. Например, осциллограф может быть настроен для сканирования значения частоты вне ожидаемого диапазона, невозможного для любой аппаратной схемы синхронизации. Затем WaveScan может остановить сканирование, сохранить осциллограмму найденного события и продолжить сканирование. Это позволяет собрать набор данных по редким событиям и быстрее отлаживать сложные процессы.

Другой специальный режим TriggerScan порадует тех, кому надо выявить особенность в очень сложном сигнале. Режим открывается в панели параметров синхронизации (см. рис. 16) и имеет множество новых возможностей, но его описание выходит за рамки статьи.

Наиболее совершенные цифровые осциллографы, как правило, оснащены функциями математической обработки осциллограмм. Осциллографы серии HDO не являются исключением. Средства для задания функций обработки вводятся в панели, которая открывается нажатием кнопки Math или из главного меню (см. рис. 17). На этом рисунке показан пример интегрирования меандра (осциллограмма результата – треугольный импульс). Видна также панель задания нужной функции. Есть функции обработки одной или двух осциллограмм (например, их сложения, вычитания, умножения и т.д.).

Принципиально новым является режим анализатора спектра, представляющий сигнал в частотной области. На рисунке 18 показано окно спектрального анализа сигнала с 50% амплитудной модуляцией 40-МГц синусоидальной несущей 1-кГц модулирующим сигналом. Режим вводится нажатием кнопки Spectrum внизу панели управления. Панель анализатора спектра (снизу на рис. 18) позволяет задавать параметры так, как это делается в обычных анализаторах спектра. Наверху построена трёхмерная спектрограмма сигнала – развёртка спектра во времени (вертикальная шкала, интенсивность гармоник представлена цветом).

В разделе «Математика» также имеется расширенная функция спектрального анализа методом быстрого преобразования Фурье (БПФ), обеспечивающая комплексный анализ (см. рис. 19) с построением реальной и мнимой частей спектра и зависимости фазы гармоник от частоты. Это придаёт осциллографам свойства векторных анализаторов спектра.

Осциллографы серии HDO позволяют строить и накладывать маски на осциллограммы. Маски могут иметь разную форму, в том числе создаваемую самой смещённой осциллограммой. Осциллограф HDO позволяет также строить большое число типов специальных диаграмм, например, статистических гистограмм, диаграмм трендов, глазковых диаграмм (см. рис. 20) и др. Они представляют интерес в основном для опытного пользователя и применяются в различных функциях.

Осциллографы HDO имеют средства декодирования сигналов данных многих типов последовательных шин (см. рис. 21). Они выполняются по заданным для каждого типа шины протоколам. Просмотр сигналов разрядов параллельных шин обеспечивают осциллографы смешанных сигналов HDO4000-MS и HDO6000-MS. Приборы этого типа имеют встроенный логический анализатор (см. рис. 22). Возможен одновременный просмотр логических (цифровых) сигналов в их особом формате и физических сигналов на аналоговых входах осциллографов.

**Рис. 21. Пример декодирования последовательной шины**

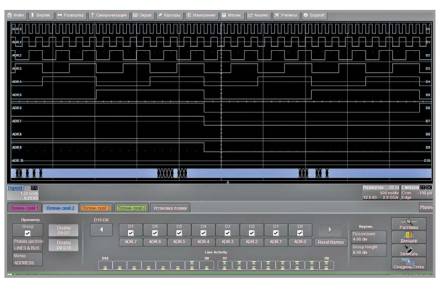

**Рис. 22. Просмотр логических сигналов на выходах делителей частоты с помощью логического анализатора**

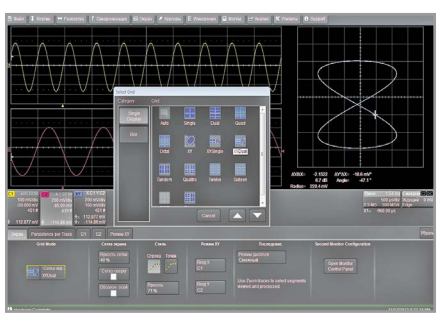

**Рис. 23. Осциллограммы двух каналов и результирующая осциллограмма в режиме XY**

В режиме XY используются два аналоговых канала осциллографа: канал CH1 даёт отклонение луча по горизонтали, а CH2 – по вертикали. Это позволяет строить фигуры Лиссажу (см. рис. 23), петли гистерезиса и др. Качество осциллограммы в окне XY такое же высокое, как и для обычных осциллограмм. При желании можно вывести только окно XY либо фигуры Лиссажу вместе с обычными и расширенными осциллограммами.

Осциллографы серии HDO имеют новую функцию подготовки отчётов LabNotebook в формате, удобном для вывода на печать.

Пользователя обычно интересуют данные о фирменном программном обеспечении осциллографа и встроенном в него персональном компьютере открытой архитектуры. В позиции утилит главного меню можно найти вывод этих данных на экран дисплея (см. рис. 24). Комментарии здесь излишни. Встроенный компьютер реализован на 4-ядерном процессоре Intel Core i5 с рабочей частотой каждого ядра 2,5 ГГц, с операционной системой Windows 7 и твердотельным диском большой ёмкости. Обратите внимание на все вкладки этой панели – в них можно найти множество других интересных данных.

Несомненно, что осциллографы высокого разрешения серии HDO4000/6000 относятся к новому классу многофункциональных и многодоменных приборов с огромными (в том числе новыми и уникальными) возможностями при умеренной стоимости и малых габаритах и весе. Приборы широко используют методы математической обработки и оснащены десятками разновидностей автоматических измерений и математических функций. Следует отметить функции просмотра осциллограмм и их истории, реализации спектрального анализа и декодирования последовательных данных. Всё это повышает конкурентоспособность новых приборов и делает их предпочтительными в ряде применений, в частности для организации рабочих мест разработчиков современной электронной аппаратуры [1, 4].

## Литература


1. *Дьяконов В.П.* Рабочее место разработчика электронной аппаратуры. Современная электроника. № 1. 2014.
2. *Корнеев С.* Осциллографы высокого разрешения HDO4000 и HDO6000. Компоненты и технологии. № 11. 2012.
3. *Дьяконов В.П.* Как потратить миллион рублей на покупку цифрового осциллографа, и что из этого выйдет? Компоненты и технологии. № 12. 2013.
4. *Дьяконов В.П.* Сверхскоростная твердотельная электроника. ДМК-Пресс. 2013.

**Рис. 24. Панель просмотра информации о встроенном компьютере и программном обеспечении**