

# Новые генераторы и осциллографы LeCroy и их взаимное тестирование

Владимир ДЬЯКОНОВ,  
д. т. н., профессор  
vpdyak@yandex.ru

Компания LeCroy — один из «трех китов», на которых базируется современная индустрия измерительных приборов. В мае 2012 года LeCroy вошла в состав крупной компании Teledyne Technologies, сохранив свой бренд. С этого времени специалисты LeCroy стали больше внимания уделять приборам среднего и даже бюджетного класса.

В этой статье описаны две новые серии цифровых генераторов сигналов специальной и произвольной формы компании Teledyne LeCroy и результаты взаимного тестирования их с новейшими осциллографами высокой точности HDO6054 компании LeCroy.

## Серия генераторов WaveStation

Серия новейших двухканальных генераторов сигналов специальной и произвольной формы (цифровых функциональных генераторов) WaveStation 2000 основана на использовании технологии прямого цифрового синтеза сигналов (DDS), которая позволяет формировать точные, стабильные и не искаженные по форме сигналы для широкого круга измерительных приложений и тестирования различных устройств [1]. Генераторы выполнены как вполне самостоятельные приборы. Они оснащены информативным цветным графическим ЖК-дисплеем и имеют удобный пользовательский интерфейс. Миниатюрный противударный корпус генераторов (рис. 1) обеспечивает возможность

их применения в неблагоприятных, например производственных, условиях.

Особенностью генераторов серии WaveStation является наличие в них двух полностью независимых выходных каналов, что обеспечивает возможность одновременной генерации сигналов с разными параметрами (частотой, амплитудой, формой и др.). Каналы различаются лишь максимальным уровнем сигнала. Генераторы имеют переключаемое выходное сопротивление 1 МОм/50 Ом, поэтому их можно подключать к различным трактам. С помощью USB-порта на передней панели пользователь может легко сохранить созданный сигнал на внешнем модуле флэш-памяти для дальнейшего использования или воспроизведения генератором.



Рис. 1. Внешний вид генератора WaveStation 2000

Таблица 1. Состав серии генераторов WaveStation

Модель	Частота (max), МГц	Объем памяти	Частота дискретизации, МГц
WaveStation 2012	10	16K	125
WaveStation 2022	25		
WaveStation 2052	50		

Выпускаются три модели генераторов, отличающихся максимальной частотой сигналов и ценой (табл. 1). Их стоимость заметно ниже стоимости аналогичных по характеристикам генераторов AFG3000 корпорации Tektronix [4]. Вес и размеры также меньше. Ближайшими аналогами приборов являются бюджетные генераторы AWG4100 [6].

Выходной уровень сигнала:

- Канал 1:
  - 2 мВ...10 Вп-п (50 Ом, <10 МГц);
  - 2 мВ...5 Вп-п (50 Ом, <10 МГц);
  - 4 мВ...20 Вп-п (1 МОм, <10 МГц);
  - 4 мВ...10 Вп-п (1 МОм, <10 МГц).
- Канал 2:
  - 2 мВп-п...3 Вп-п (50 Ом);
  - 4 мВ...6 Вп-п (1 МОм).

Другие характеристики генераторов:

- Формы сигналов: синус, меандр, треугольник, импульс, шум.
- Режимы модуляции: АМ, ФМ, ЧМ, АМн, ФМн, ЧМн, ШИМ; режимы ГКЧ и формирования пакетов (Burst).
- Встроенный частотомер 100 мГц...200 МГц.
- Интерфейс: USB и GPIB (USB-кабель, адаптер).
- Габариты: 105×229×280 мм.
- Вес: 2,6 кг.

Основные характеристики приборов:

- Два канала (выхода) с разной максимальной амплитудой и независимой установкой параметров сигналов.

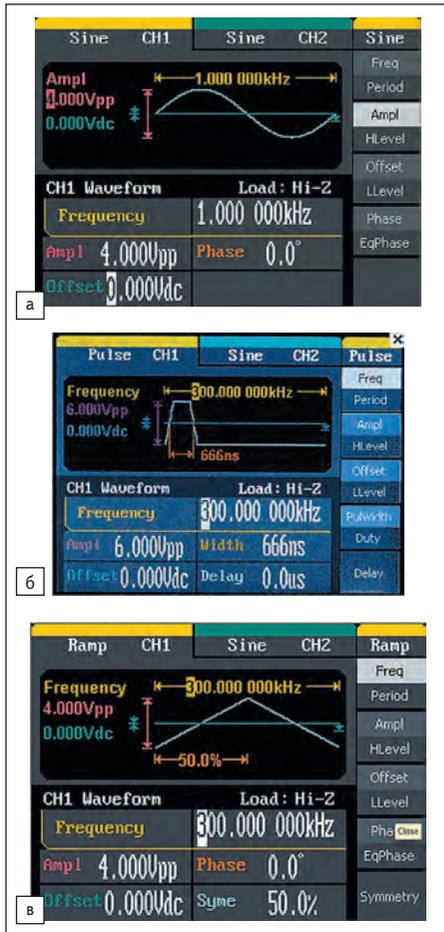


Рис. 2. Экран генератора с установкой: а) генерации синусоидального сигнала; б) параметров генерации импульсного сигнала; в) параметров треугольного сигнала (Ramp)

- Диапазон частот (синус): 1 мГц...10 МГц/25/50 МГц (в зависимости от модели).
- Разрешение по частоте: 1 мГц.
- Разрядность ЦАП: 14 бит.
- Частота дискретизации: 125 МГц.
- Память: 16 тысяч точек.
- Погрешность частоты (за один год):  $1 \times 10^{-4}$  (опция:  $\pm 2 \times 10^{-7}$ ).
- Стандартные формы сигнала (пять видов): синусоидальный, прямоугольный, треугольный, импульс, белый шум.
- Режим формирования 45 видов предустановленных сигналов и сигналы произвольной формы.
- Виды модуляции: АМ, ФМ, ЧМ, ЧМн, АМн, ШИМ.
- Режимы: ГКЧ (сви́пирование), формирование пакета (Burst) 1–50 000 импульсов (при минимальной длительности 1 мкс), период повторения пакетов: от 1 мкс до 500 с, начальная фаза:  $0,1^\circ$ – $360^\circ$ .
- Вход внешнего ОГ (10 МГц), синхронизация (вход и выход).
- Интерфейс USB (ДУ, программирование), опция GPIB (КОП).
- ПО для формирования сигналов СПФ.

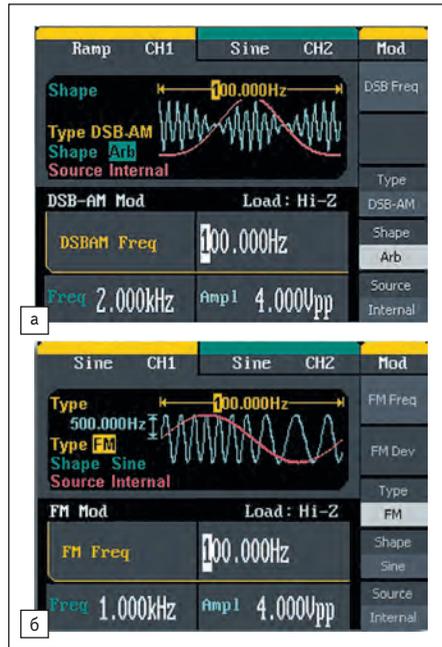


Рис. 3. Экран генератора с установкой: а) амплитудно-модулированного сигнала; б) частотно-модулированного сигнала

• Опция 100: термостатированный опорный генератор (стабильность:  $\pm 2 \times 10^{-7}$ ).  
Приборы имеют небольшой цветной графический дисплей (диагональ: 9 см, разрешение: 320×240 пикселей). Этого вполне достаточно для представления стилизованной формы сигнала, панелей с ее основными параметрами, графического меню и прочих элементов пользовательского интерфейса (рис. 2а).

Столбец кнопок по центру передней панели задает тип генерируемых сигналов. По умолчанию это синусоидальный сигнал. Нажав кнопку с изображением импульса, можно перейти на генерацию импульсного сигнала (рис. 2б). Аналогично нажатием кнопки с изображением треугольного импульса можно задать генерацию треугольного сигнала с линейным нарастанием и спадом (рис. 2в).

Генератор имеет обширные возможности по созданию модулированных сигналов. На рис. 3а показано окно дисплея генератора с установкой амплитудно-модулированного (вид модуляции DSB-AM — две боковые полосы с подавлением несущей) синусоидального сигнала (голубая линия). Показан и модулирующий сигнал (красная линия).

Экран дисплея при задании частотно-модулированного сигнала представлен на рис. 3б. Как и на рис. 3а, приведена стилизованная форма модулированного и модулирующего сигналов.

В панели под графиками форм сигнала можно установить основные параметры сигналов. Обратите внимание на боковое меню экрана: оно позволяет выбрать тип модуляции и обеспечивает некоторые установки.

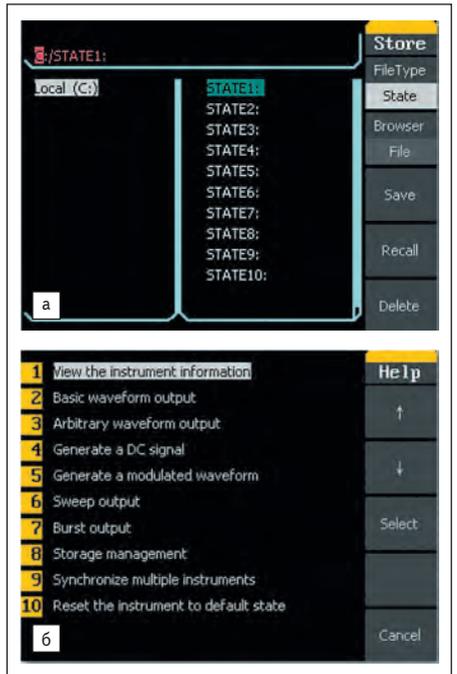


Рис. 4. Экран генератора с меню: а) операций установок; б) справки

Установки генератора и соответствующие им сигналы могут храниться в памяти генератора. Всего можно сохранять во внутренней памяти и использовать до 10 установок генератора: от STATE1 до STATE10 (рис. 4а). Большое число установок и форм сигнала можно сохранять во внешнем модуле флэш-памяти, который вставляют в USB-гнездо на передней панели генератора.

Генератор имеет встроенную справочную систему. Начальный экран справочной системы показан на рис. 4б. Применение справочной системы позволяет пользователю не отвлекаться на поиск руководства по эксплуатации при затруднениях работы с прибором.

Для хранения и вызова файлов сигналов имеются соответствующие средства (рис. 5).

Возможности генератора существенно возрастают при подключении его к ноутбуку, настольному компьютеру или другому измерительному прибору. Для этого генераторы имеют разъемы универсальной последовательной шины USB (рис. 6). Однако генераторы этого типа — вполне самостоятельные приборы и позволяют реализовать все возможности и без подключения к ПК.

На рис. 7 показано окно программы ПК для ввода и редактирования формы сигналов генератора. Окно формируется на экране ПК с высоким разрешением и позволяет отображать и редактировать реальную форму задаваемого сигнала.

Таким образом, генераторы WaveStation являются многофункциональными, малогабаритными и легкими приборами для всестороннего применения в практике исследования и тестирования электронных систем

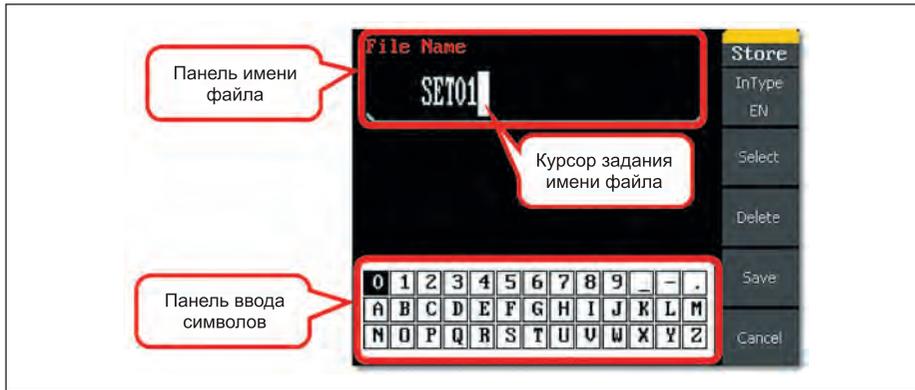


Рис. 5. Средства задания имени и записи файла

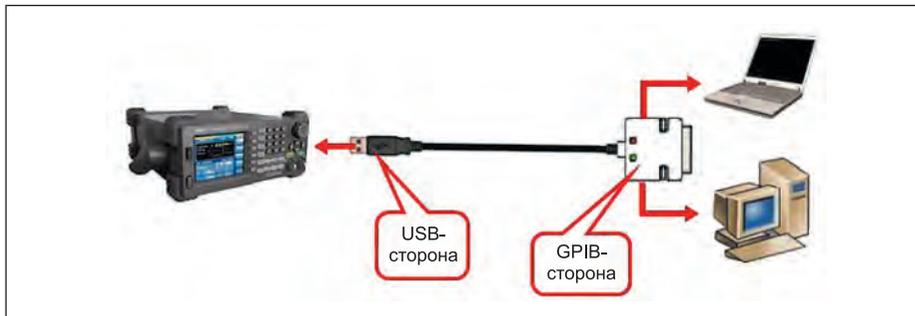


Рис. 6. Подключение генератора к ноутбуку и настольному ПК



Рис. 8. USB-генератор серии ArbStudio, подключенный к ноутбуку



Рис. 9. Генератор ArbStudio серии 1104D с подключенным пробником цифровых (логических) сигналов

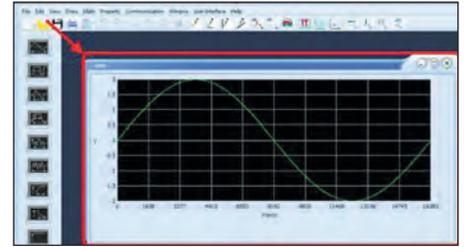


Рис. 7. Окно программы ввода и редактирования формы сигналов с помощью ПК

и устройств не слишком высокого быстродействия.

### USB-генераторы серии ArbStudio

Компания Teledyne LeCroy представила также обновленную серию цифровых USB-генераторов сигналов произвольной формы ArbStudio (рис. 8) [2]. Предшествующие модели этих генераторов известны у нас в России благодаря генераторам АК ИП-3404/3405 [6]. Новые генераторы являются современными приборами на базе ПК, которые формируют высокоточные выходные сигналы с высокой частотой (до 125 МГц в режиме синусоидальных сигналов) с частотой дискретизации до 1 ГГц. Они имеют высокое разрешение по амплитуде (16 бит в режиме ARB и 36 бит в режиме DDS), длинную внутреннюю память (до 2 Мбит) и способны генерировать аналоговые сигналы с различными видами модуляции, а также создавать цифровые 36-разрядные кодовые последовательности. Выходной уровень сигнала — до 20 Вп-п на нагрузке 1 МОм и до 10 Вп-п на нагрузке 50 Ом.

Генераторы имеют два или четыре полностью независимых канала и могут синхронизироваться посредством специального кабеля AS-SYNC. Таким образом, можно получить из нескольких генераторов многоканальную систему. Управление генераторами осуществляется с помощью внешнего ПК, что позволяет снизить цену за счет отказа от использования встроенного монитора, а также получить большее количество каналов в одном приборе.

Программное обеспечение для управления имеет удобную древовидную структуру, что облегчает процесс навигации и моделирования сигналов. Наиболее часто используемые формы сигналов, например простейшие DDS или ШИМ, имеют выделенное окно управления, предназначенное только для оперативного управления параметрами таких форм сигналов.

Семейство генераторов ArbStudio состоит из четырех моделей, представленных в таблице 2. Приборы питаются от миниатюрного внешнего адаптера, входящего в комплект поставки (рис. 9). В него входит также диск с программным обеспечением и руководство по эксплуатации на русском языке [2].

**Таблица 2.** Классификационные параметры USB-генераторов ArbStudio

Модель	Количество каналов	Разрядность, бит	Дискретизация, Гвыб./с	Тип генератора
ArbStudio 1104D	4	16	1	AWG и DDS
ArbStudio 1104				AWG
ArbStudio 1102D	2	16	1	AWG и DDS
ArbStudio 1102				AWG

Габариты приборов — 62×326×182 мм, вес — 1,3 кг, потребляемая мощность — менее 20 Вт, рабочая температура — от +5 до +35 °С.

Известно, что генераторы сигналов произвольной формы могут формировать выходной аналоговый сигнал двумя способами: прямым цифровым синтезом (DDS) либо непосредственным формированием сигналов произвольной формы (AWG). Оба этих способа имеют свои достоинства и определенные ограничения. Например, DDS позволяет легко генерировать ряд типов стандартных по форме сигналов: синус, меандр, треугольник, пила, гауссовский импульс, шум и постоянное напряжение. Набор сигналов зависит от программы, которая поставляется с конкретным прибором.

Генераторы ArbStudio уникальны тем, что позволяют использовать оба способа формирования выходного сигнала, причем одновременно на разных каналах. Возможно проведение математических операций с сигналами каналов. В генераторах ArbStudio каналы являются полностью независимыми и могут иметь различные настройки (частота, амплитуда, фаза, дискретизация и др.). При этом доступно объединение внутренних каналов с целью получения результирующего сигнала.

Частота синусоиды в генераторах ArbStudio — до 100 МГц, минимальная длительность фронтов прямоугольного импульса — до 0,8 нс (к сожалению, пока не подтверждена). В режиме формирования AWG можно задавать сигналы с частотой до 125 МГц и длиной, ограниченной памятью до 2 Мбит.

USB-генераторы сигналов произвольной формы ArbStudio имеют сегментированную память и позволяют формировать сигнал любой сложности при минимальном использовании ресурсов внутренней памяти.



Рис. 10. Начальное окно установки программы ArtStudio

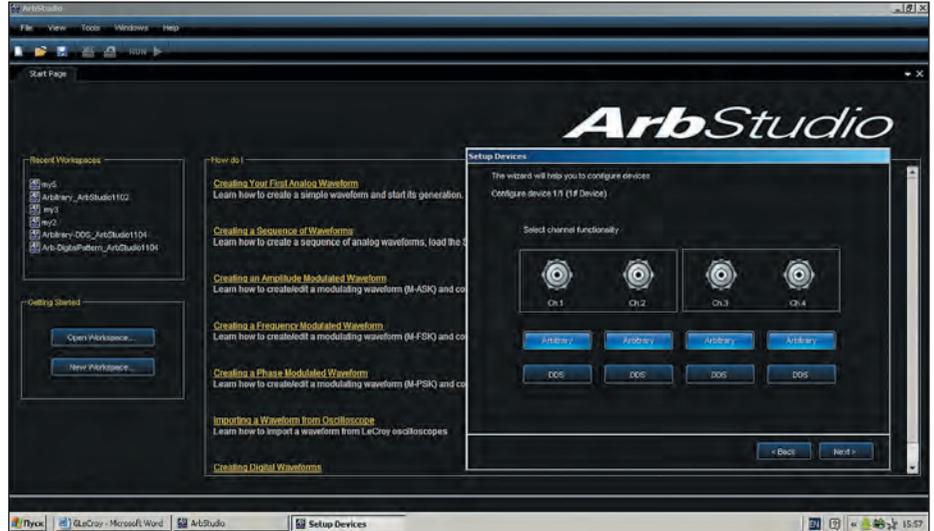


Рис. 11. Окно программы ArbStudio с окном конфигурации выходов генератора

Для управления генераторами ArbStudio служит специальное программное обеспечение для ПК, которое должно быть установлено на жесткий диск компьютера (или циф-



Рис. 12. Виртуальная передняя панель генератора в режиме DDS на фоне окна Windows XP компьютера

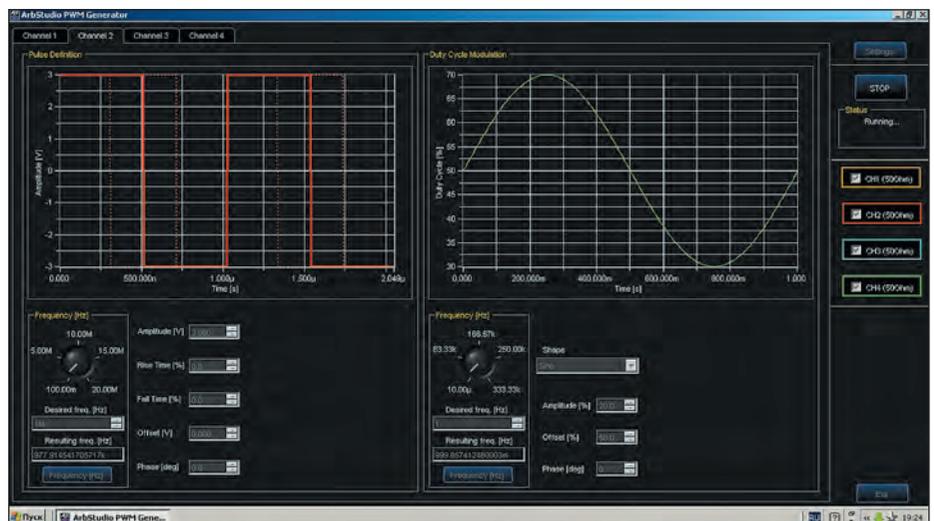


Рис. 13. Виртуальная панель генератора в режиме ШИМ DDS

рового осциллографа). Инсталляция проходит в несколько вполне обычных для такой процедуры этапов, каждый из которых имеет свое информационное или диалоговое окно. Первое из них показано на рис. 10. Для перехода к следующему окну следует нажать мышью на кнопку Next и т. д. до завершения инсталляции программы.

Эта программа обладает следующими функциональными возможностями:

- создание виртуального интерфейса пользователя, напоминающего обычный аппаратный интерфейс генераторов сигналов;
- управление элементами интерфейса с помощью мыши;
- обзор и редактирование генерируемых сигналов;
- формирование сложного сигнала из простых сегментов;
- использование упрощенного управления в режиме DDS для формирования простого сигнала;
- применение различных типов модуляции: AM, FM, PM, ASK, FSK, PSK, PWM;
- задание компонентов сигнала при помощи встроенных формул;
- интеграция с внешними программными оболочками, такими как Excel и Mathcad;
- использование цифровых фильтров (Баттерворта, Чебышева, инверсный Чебышева, эллиптический, Бесселя);
- наложение шума.

Программа (рис. 11) позволяет создать (или загружать ранее созданное рабочее место) WorkSpace и имеет окно для конфигурации выходов сигналов (тоже показанное на рис. 11). Каждый канал можно задать с указанием метода формирования сигнала — Arbitrary и DDS.

Кроме ярлыка программы ArbStudio, при установке программы в окне Windows создаются два дополнительных ярлыка: ArbStudio Function Generator и ArbStudio PWM Generator (рис. 12). Первый при активизации, создает довольно красочную но примитивную по возможностям виртуальную панель генератора с привычными органами управления в виде поворотных ручек. Их можно вращать, используя стандартную мышь компьютера. Такая панель имитирует аналоговый способ управления параметрами сигнала и ликвидирует известный недостаток цифровых генераторов — отсутствие плавного изменения параметров сигнала.

Можно задать виртуальную панель и для сигналов с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) (рис. 13). В этом случае число плавно регулируемых параметров уменьшается до одного — частоты. Все параметры, естественно, можно менять в цифровой форме.

Однако для полной реализации всех возможностей генератора следует работать в окне программы ArtStudio. Она, в основном, подобна описанной в [5]. Например, для редактирования формы генерируемых колебаний можно воспользоваться стандартным редактором формы сигналов программы ArtStudio. Его окно показано на рис. 14.

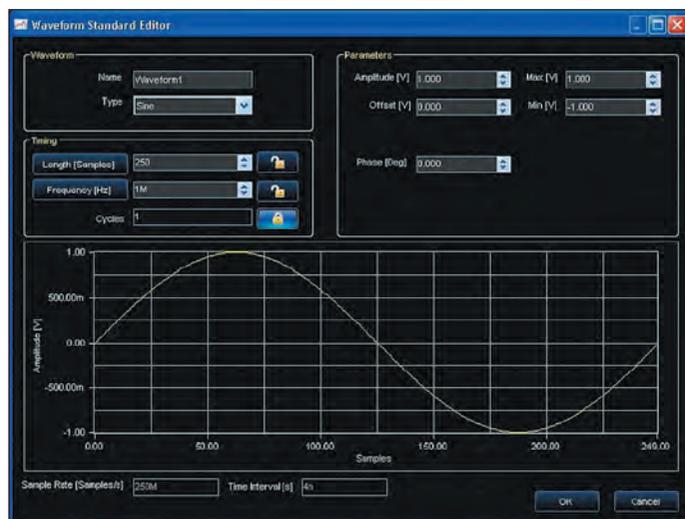


Рис. 14. Стандартный редактор формы сигнала



Рис. 15. Редактор математических формул

Большинство используемых на практике сравнительно простых сигналов можно описать с помощью математических формул. Для задания таких формул служит специальный редактор формул. Его окно приведено на рис. 15 с примером задания формулы.

На рис. 16а показано окно с заданием по формуле импульса Гаусса. Такой сигнал часто используется в современных линиях связи и обеспечивает спектр с минимальной шириной.

Прибор позволяет осуществлять генерацию сигналов с различными видами модуляции. Такие сигналы часто описываются с помощью математических формул. На рис. 16б показано задание по формуле амплитудно-модулированного сигнала. Форма сигнала отчетливо представлена в соответствующем окне, и параметры сигнала в цифровой форме легко менять.

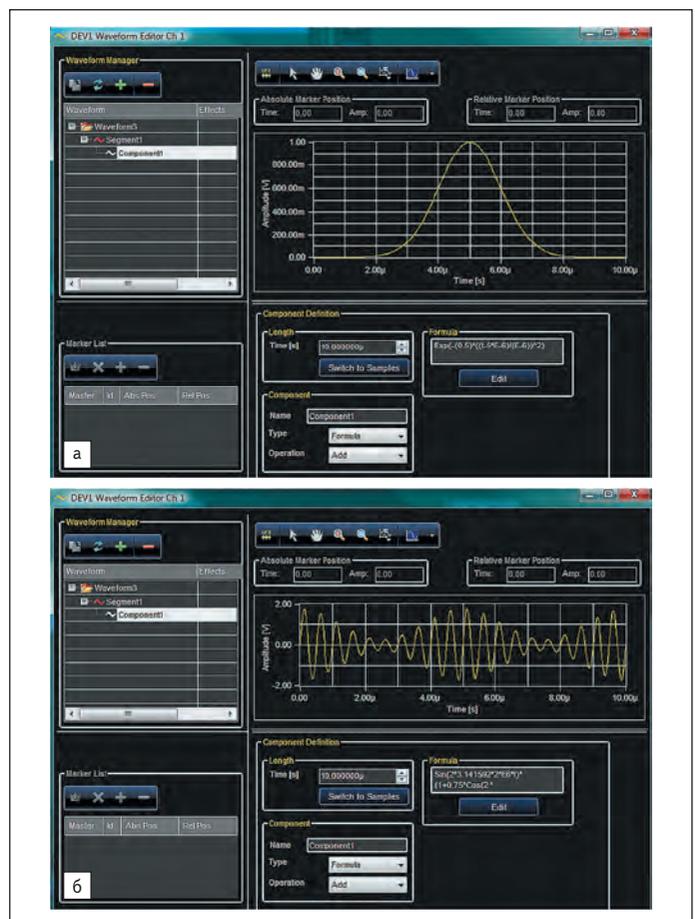


Рис. 16. Задание: а) импульса Гаусса; б) амплитудно-модулированного (AM) синусоидального сигнала

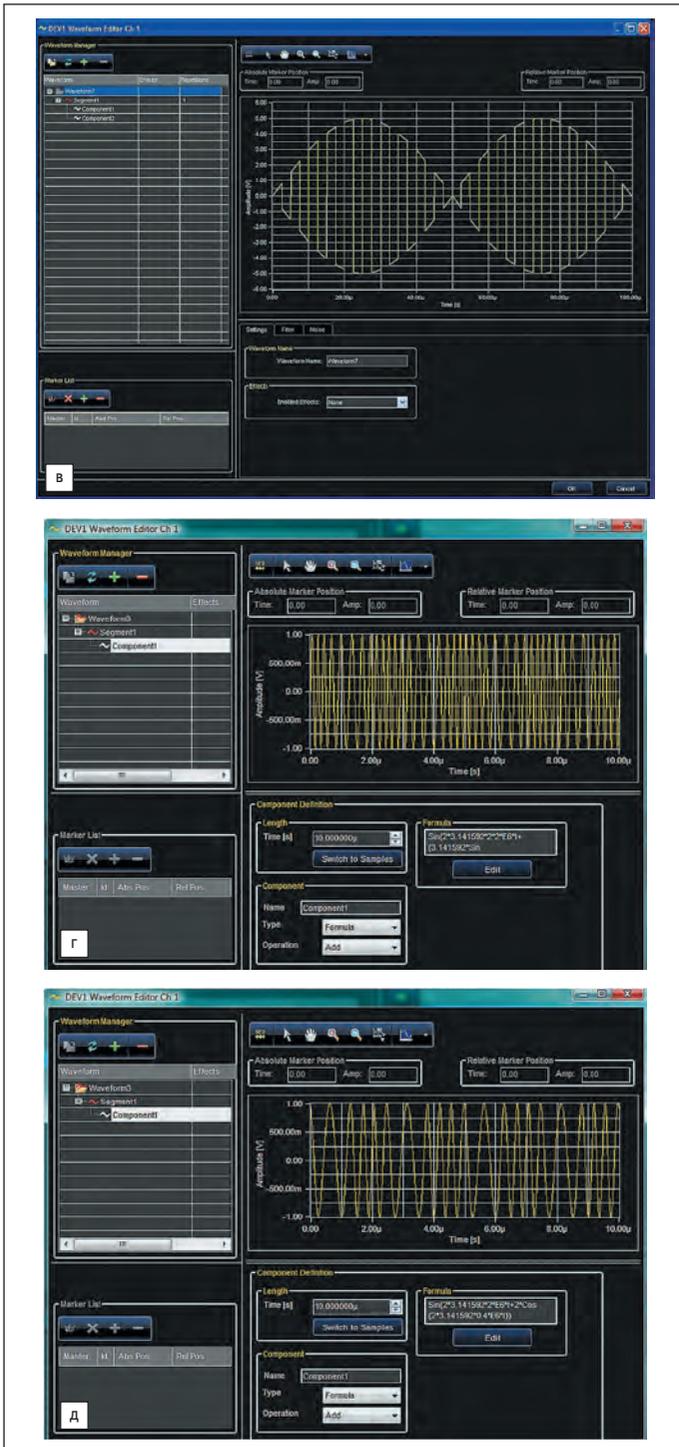


Рис. 16. Задание: в) амплитудной модуляции меандра; г) частотной модуляции (FM); д) сигнала с фазовой модуляцией (PM)

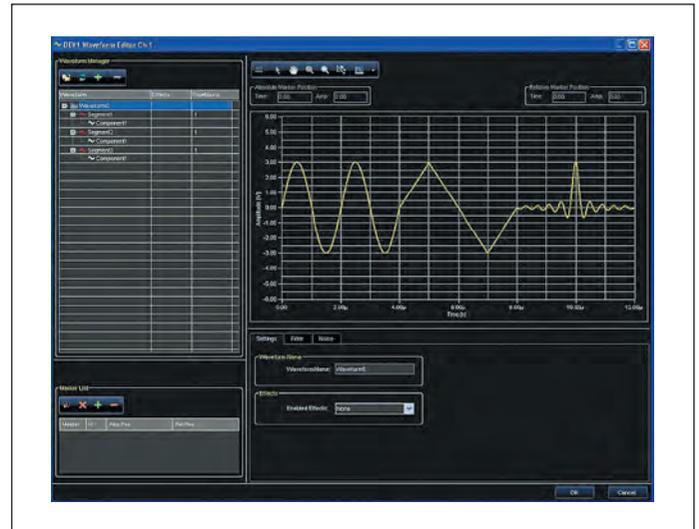


Рис. 17. Создание комбинированного сигнала из отрезков стандартных сигналов

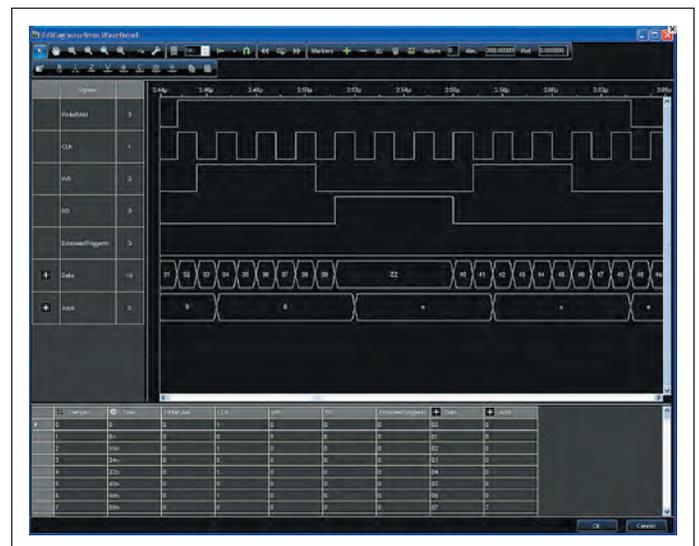


Рис. 18. Создание сложного цифрового сигнала — паттерна

Обеспечена модуляция не только синусоидальных сигналов, но и других, имеющих конкретный параметр — амплитуду. К примеру, это импульсы, меандр, треугольный сигнал (но не шум). Задание амплитудной модуляции меандра приведено на рис. 16в.

На рис. 16г показан пример задания частотной модуляции синусоидального сигнала, а на рис. 16д — пример задания фазовой модуляции. Оба вида сигнала имеют схожую форму.

Могут задаваться следующие виды модуляции: FSK, BPSK, QPSK, PI/4, DQPSK, SPSK, 8PSK, 16PSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM, пользовательская, а также несущая сигнал стандартной формы или произвольной формы (скорость передачи — до 1 МГц).

Генератор позволяет создавать сложные комбинированные сигналы, состоящие из сегментов простых сигналов. Техника этого описана в [5]. На рис. 17 показано создание сигнала из трех отрезков простых сигналов — двух периодов синусоиды и по одному периоду треугольного сигнала и сигнала  $\sin(x)/x$ .

В моделях ArbStudio 1102D, ArbStudio 1104D имеется встроенный цифровой генератор кодовых последовательностей (pattern generator-sampler) (рис. 18), значительно расширяющий возможности прибора по тестированию различного рода аналоговых и цифровых устройств. Для получения сигнала с цифрового выхода генератора нужен специальный логический адаптер с головкой, имеющей колодку для подключения соединительных проводников (поставляется как опция).

Генераторы серии ArbStudio полностью совместимы с осциллографами LeCroy. Это позволяет устанавливать программное управление ArbStudio непосредственно в оболочку осциллографа. Осциллограммы, полученные осциллографом LeCroy, могут быть переданы в цифровом виде в генераторы серии ArbStudio, и, таким образом, генератор будет воспроизводить сигнал, который был захвачен на входе осциллографа. Возможна совместная работа нескольких генераторов. Приборы ориентированы на профессиональное применение.

## Новейшие осциллографы высокого разрешения LeCroy HDO6000

Осенью 2013 г. на российский рынок поступили новейшие [7] осциллографы высокого разрешения HDO4000/6000 компании Teledyne LeCroy (рис. 19). Их разработка — новый крупный шаг в развитии цифровой осциллографии. Компания «ЛеКрой Рус» предоставила автору редкую возможность исследовать и всесторонне, без спешки оценить новый осциллограф HDO6054 в работе.



Рис. 19. Осциллограф высокого разрешения HDO4000/6000-MS фирмы Teledyne LeCroy со встроенным логическим анализатором

А 13 ноября 2013 г. Teledyne LeCroy анонсировала и новинку — осциллографы HDO4000-MS и HDO6000-MS (девять моделей с полосой от 200 МГц до 1 ГГц). Приборы MS (Mixed Signal) имеют встроенный логический анализатор и могут применяться как осциллографы смешанных (аналоговых и цифровых) сигналов.

Новые приборы HDO6000 — это 4-канальные осциллографы с полосой 350, 500 и 1000 МГц при скорости дискретизации 2,5 Гвыб./с. Эквивалентная частота дискретизации — до 100 ГГц (у HDO6000-MS до 125 ГГц). Каждый канал имеет свой АЦП с повышенной до 12 бит разрядностью, что в 16 раз снижает уровень дискретизации. Приборы обладают памятью осциллограмм 50 Мбайт на канал (с опцией — до 250 Мбайт).

Погрешность измерения амплитуды уменьшена до  $\pm 0,5\%$  — втрое по сравнению с погрешностью большинства осциллографов с разрядностью 8 бит. Число автоматических измерений увеличено до 56, одновременно могут отображаться до восьми автоматических измерений и восемь параметров статистики. Приборы отличаются очень широким диапазоном развертки — от 20 пс/дел. до 1000 с/дел., большим числом режимов синхронизации и обширным набором математических операторов и функций.

Осциллографы имеют открытую архитектуру и выполнены на микропроцессоре Intel Core 5 с тактовой частотой 2,6 ГГц и операционной системой Windows 7. Уникален экран дисплея с высоким разрешением и очень удобным сенсорным управлением (можно касаться пальцем или стилусом, имеющимся в приборе). Используются новые технологии управления сенсорным экраном TouchScreen, запуска по аномальным событиям TriggerScan и обзора осциллограмм WaveScan по множеству критериев, работы с историей отображения сигналов History, средство создания отчетов LabNotebook, декодирования сигналов шин многих типов Decode, построения гистограмм, «глазковых» и звездных диаграмм и др. Следует отметить, что многие из этих возможностей были доступны ранее (даже в HDO4000) в виде отдельно приобретаемых опций.

Например, для осциллографов LeCroy была давно разработана дорогая опция — программа SPETCRUM с расширенными возможностями спектрального анализа [3]. Уникальной особенностью

новейших осциллографов LeCroy HDO6000 стало включение этой и многих других опций в штатный состав приборов, причем без их удорожания. Наконец, нельзя не отметить уменьшенные габариты (например, толщина составляет около 13 см, а общие размеры —  $400 \times 132 \times 292$  мм) и вес осциллографов (до 6 кг) и заметно сниженную потребляемую мощность (до 340 Вт).

Эти сведения даны лишь для начального ознакомления. Планируется серия обзорных статей по возможностям этих новейших приборов.

## Взаимотестирование генераторов и осциллографов LeCroy

Генераторы LeCroy — это высокоточные устройства для исследования и тестирования различных электронных устройств. Форма и параметры сигналов генераторов стилизованно отображаются на экранах их дисплеев или на экране ПК с высоким разрешением (для USB-генераторов). Однако это не реальная форма сигнала, и она не способна отразить изменения сигналов, вызванные неточностью калибровки, нарушениями согласования, возникновением отражений и даже исчезновением сигнала из-за обрыва линий передачи (коаксиальных кабелей) и плохим контактом в разъемах. Есть только один способ наблюдать реальные сигналы на выходе генераторов — просматривать их с помощью высококачественного осциллографа.

Осциллограммы синусоидального и треугольного сигнала от генератора ArbStudio на экране осциллографа с высоким разрешением HDO6054 с полосой каждого из четырех каналов 500 МГц с малой частотой повторения (до примерно 100 кГц) показаны на рис. 20а. Осциллограммы выглядят просто безупречно — нет ни малейших признаков геометрических искажений формы сигналов и их ступенчатости, обусловленной квантованием. В данном случае даже непонят-



Рис. 20. Осциллограммы синусоидального и треугольного сигналов: а) низкой частоты; б) с предельно высокой частотой генератора ArbStudio

но, какой прибор используется для тестирования: то ли осциллограф тестируется генератором, то ли генератор осциллографом.

Но стоит увеличить частоту повторения сигналов, как их искажения становятся заметными. На рис. 20б приведены те же осциллограммы на максимальной частоте сигнала генератора. (На рис. 17 ручка установки частоты повернута до максимума частоты соответствующего сигнала — 125 МГц для синусоидального и 32,5 МГц для треугольного сигнала.) Естественно, что искажения заметно сильнее для треугольного сигнала: у него видны не только геометрические искажения формы (например, округление верхушек), но и снижение амплитуды.

До искажений формы сигнала во временной области у генераторов, описанных выше, дело не доходит. Однако такие искажения, даже весьма небольшие, легко выявляются в частотной области с помощью спектрального анализа методом быстрого преобразования Фурье (БПФ). Опция спектрального анализа включается специальной кнопкой Spectrum на передней панели прибора. Она открывает удобную панель настройки спектрального анализа в нижней части экрана.

Замечательно, что настройка спектрального анализа выполняется профессионально — как у специальных цифровых анализаторов спектра. Например, частотный диапазон анализа спектра определяется установкой центральной частоты и ширины частотного диапазона span либо просто начальной и конечной частоты. Отдельно устанавливается частотное разрешение RBW и тип оконного фильтра. Нельзя не отметить новые возможности спектрального анализа — с быстрым выводом результатов, персистенцией и построением двумерных (2D) и даже трехмерных (3D) спектрограмм, разворачивающих частотный спектр во времени.

Анализ спектра возможен в линейном масштабе, часто наиболее наглядно представляющим результаты и мало искаженном шумовой дорожкой спектра (рис. 21а). Спектральные пики могут автоматически помечаться маркерами с простановкой их номеров и выдачей таблицы с параметрами спектральных пиков. Более того, пики могут помечаться частотой своего максимума. Спектральный анализ синусоидального сигнала отчетливо фиксирует его первый пик и последующие пики высших гармоник.

При логарифмическом масштабе резко повышается динамический диапазон анализа спектра, выявляются более слабые гармоники и шумы (рис. 21б). Сигнал в этом случае измеряется в дБ, дБм (децибелы мощности), дБн (децибелы напряжения) и т. д. Разрешающая способность по частоте может доходить до единиц Гц, что достигается далеко не у всех настольных цифровых анализаторов спектра.

Панель управления параметрами спектрального анализа всегда можно убрать с экрана (и вывести вновь нажатием кнопки Spectrum). Это высвобождает больше места под спектрограммы, осциллограммы и их спектр (рис. 22). При вводе численных значений параметров появляется удобное наборное окно.

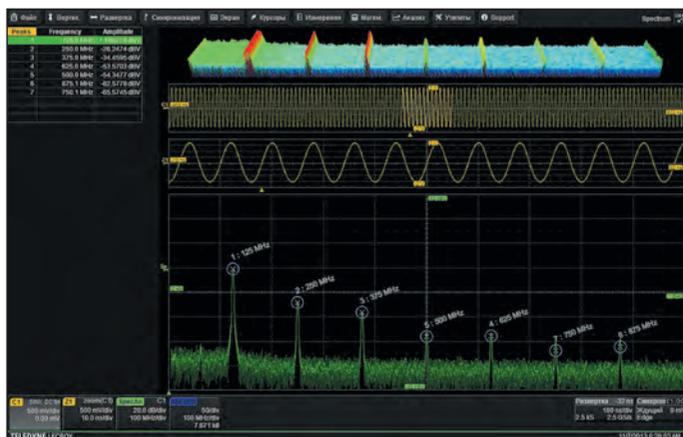


Рис. 22. Осциллограммы, спектр и 3D-спектрограмма сигнала с частотой 125 МГц

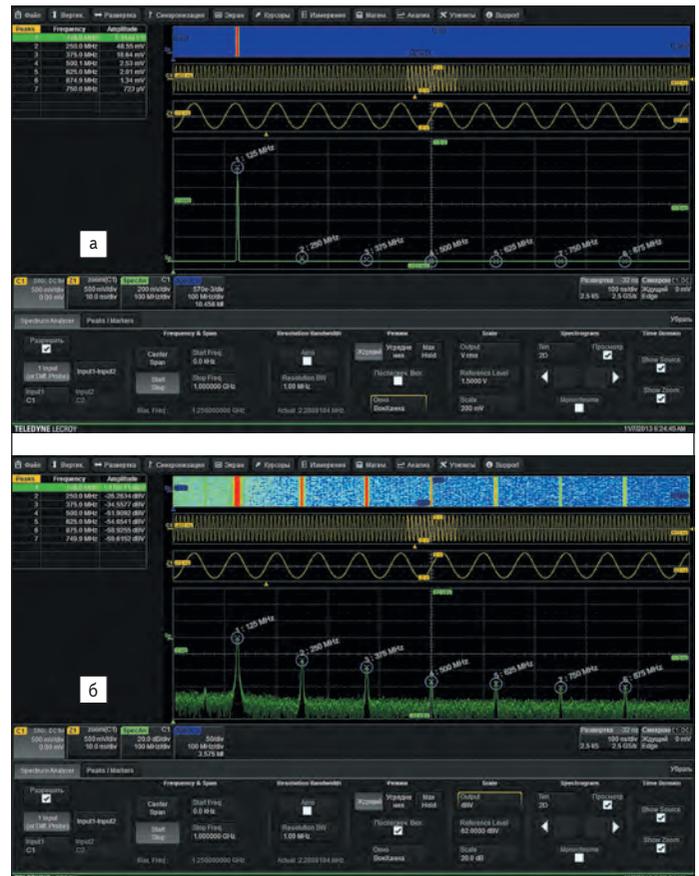


Рис. 21. Спектральный анализ синусоидального сигнала с частотой 125 МГц: а) при линейном масштабе спектра; б) при логарифмическом масштабе спектра

О высочайшей разрешающей способности анализа спектра по частоте у новых осциллографов свидетельствует анализ спектра модулированных колебаний, например получаемых с выхода генераторов WaveStation (рис. 23). Здесь спектр отчетливо выявляет две основные боковые полосы сигнала и несущую частоту в середине между ними. Выявляются даже малые частотные составляющие сигнала, отсутствующие в его теоретическом спектре. Разрешение по частоте (RBW) в этом примере равно 10 Гц. Это очень малая частота для БПФ цифровых осциллографов и даже специальных анализаторов спектра.

В более удобном масштабе спектр и трехмерная спектрограмма показаны на рис. 24. Следует отметить, что для построения неискаженной осциллограммы при низкой частоте модулирующего сигнала



Рис. 23. Спектральный анализ АМ-сигнала с несущей частотой 40 МГц, частотой модулирующего сигнала 1 кГц и глубиной модуляции 50%

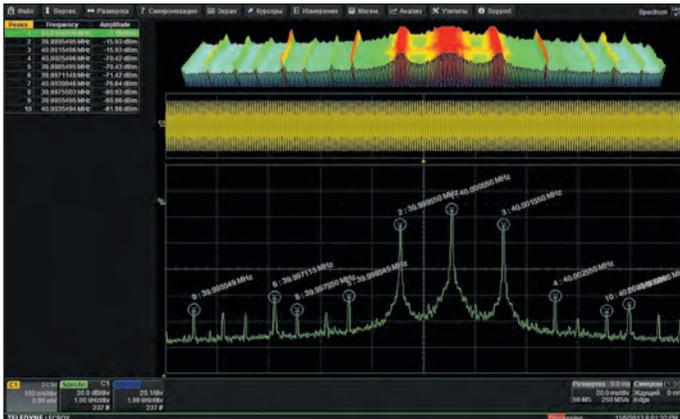


Рис. 24. Спектр и трехмерная спектрограмма AM-сигнала

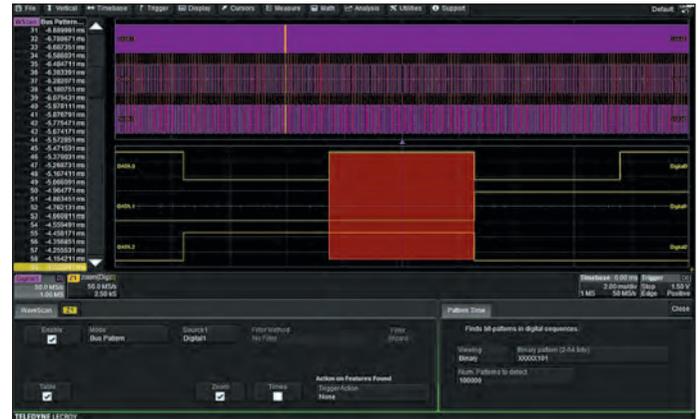


Рис. 25. Окно WaveScan осциллографа смешанных сигналов

необходимо очень большое число отсчетов сигнала и большой объем памяти осциллограмм. Им обладает HDO6000 даже в штатном исполнении.

Окно WaveScan для осциллографа смешанных сигналов HDO4000/6000 MS приведено на рис. 25. Просматривается сложный сигнал — битовый паттерн. Максимальная частота входных логических сигналов равна 250 МГц.

## Заключение

Приборы компании LeCroy всегда славились высочайшим качеством при довольно высокой стоимости. Новые генераторы WaveStation и ArbStudio относятся к приборам умеренной стоимости и вместе с новейшими осциллографами высокого разрешения HDO4000/6000 и HDO4000-MS/HDO6000-MS могут стать основой для рабочих мест различного назначения — от предназначенных для глубокого изучения и исследования электронных устройств до тестирования электронных компонентов и изделий в военной, аэрокосмической, связной, радарной и телевизионной аппаратуре [8]. Осциллографы DMO6000 имеют новые возможности (сенсорный экран, 12-битное аппаратное и 15-битное программное разрешение, уникальные средства спектрального анализа, возможность оценки и измерения джиттера, анализа последовательных данных и источников питания и т. д.). Мы только начали их изучать, поэтому они нуждаются в более осмысленном и глубоком описании. ■

Автор выражает благодарность генеральному директору компании «ЛеКрой Рус» Александру Дедюхину за предоставленные для испытания и оценки приборы.

## Литература

1. Teledyne LeCroy. WaveStation Function/Arbitrary Waveform Generator. Operator's Manual. March 2013.
2. Teledyne LeCroy. ArbStudio Arbitrary Waveform Generator. Operator's Manual. Jan. 2013.
3. Дедюхин А. Исследование сигналов с применением спектрального анализа для цифровых осциллографов. Эквивалентная дискретизация цифровых осциллографов LeCroy — [www.ptst.ru](http://www.ptst.ru). 2006.
4. Дьяконов В. Развитие серии генераторов произвольных функций AFG3000 компании Tektronix и их применение // Компоненты и технологии. 2009. № 11.
5. Дедюхин А. АКПП-3403, АКПП-3404 и АКПП-3405 — современные USB-генераторы сигналов произвольной формы с сегментированной памятью. Ч. 1, 2 // Компоненты и технологии. 2010. № 1–2.
6. Дьяконов В. Многофункциональные бюджетные генераторы АКТАКОМ серии AWG-41xx // Компоненты и технологии. 2013. № 1.
7. Корнеев С. Осциллографы высокого разрешения HDO4000 и HDO6000 // Компоненты и технологии. 2012. № 11.
8. Дьяконов В. Как потратить миллион рублей на покупку цифрового осциллографа и что из этого выйдет? // Компоненты и технологии. 2013. № 12.