

# ИЗМЕРЕНИЯ В ЦИФРОВЫХ ОСЦИЛЛОГРАФАХ

Александр Дедюхин, генеральный директор, ЗАО «ПРИСТ»

**В статье на примере приборов компании LeCroy подробно описаны возможности современных цифровых запоминающих осциллографов. Основной акцент сделан на их использование в качестве средств измерения сигналов переменного тока.**

## ВВЕДЕНИЕ

Современные цифровые запоминающие осциллографы (ЦЗО), построенные на базе открытой платформы, дают возможность пользователю визуально наблюдать исследуемый сигнал сложной формы. Использование длинной памяти, расширенных режимов синхронизации и сегментированной развертки позволяют фиксировать различные артефакты во входном сигнале или регистрировать полезные сигналы с определенными параметрами.

Однако не следует забывать, что ЦЗО также является и средством измерения. Большинство ЦЗО способны производить измерения значительного числа параметров сигнала, например, осциллографы серии WaveRunner производства LeCroy измеряют до 40 параметров сигнала, с одновременной индикацией 8 результатов измерений в штатном режиме, а при установке дополнительных опций ЦЗО LeCroy старших серий способны приводить измерения до 170 различных параметров. Среди них широкий набор различных амплитудно-временных измерений, достаточных для широкого круга пользователей.

Современные ЦЗО в основном измеряют амплитудные и временные параметры сигнала, но способны осуществлять и иные измерения, например, подсчет числа целых периодов сигнала, числа точек дискретизации, числа пиков гистограммы и т.д. К амплитудным измерениям относятся измерения амплитуды нижнего значения, верхнего значения, пиковые значения, выбросы, среднеквадратическое значение и многие другие, а также математическая обработка измеренных величин.

К временным измерениям причисляют измерение параметров сигнала, нормированных по времени, — частота, период, длительность, фазовые сдвиги, время нарастания и спада, параметры джиттера и т.д. Современные ЦЗО имеют и производные виды измерений от амплитуды и времени, например, измерение

площади сигнала, что применительно к импульсному сигналу определяет его энергию, измерение числа периодов сигнала на заданном участке или измерение числа точек дискретизации, образующих форму сигнала на всем экране или на заданном участке. В ЦЗО также возможны специализированные виды измерений, например, измерение параметров мощности электрического сигнала, измерение параметров систем последовательной передачи данных, измерение параметров дисковых или оптических приводов и многие другие. Но и эти виды измерений базируются на основных результатах измерения амплитудно-временных параметров сигнала.

## ИЗМЕРЕНИЯ АМПЛИТУДНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Погрешность измерения амплитудных параметров определяется, в частности, 8-разрядными АЦП, которые используются в большинстве ЦЗО, относительная погрешность измерения, возникающая за счет погрешности дискретизации, составит  $1/2^8 \cdot 100\% = 0,39\%$ . Учитывая нелинейности входных усилителей и АЦП, температурный дрейф, погрешности коэффициента усиления входных усилителей и т.д., погрешность измерения постоянного напряжения приближа-

ется к 3%, а погрешность дифференциальных измерений напряжения составляет 1,5%. Это значительная величина, особенно если учесть, что погрешность измерения постоянного напряжения средним вольтметром составляет 0,025%. Но принимая во внимание, что ЦЗО, прежде всего, прибор, используемый для визуального наблюдения сигнала, и что АЧХ большинства современных осциллографов линейна в полосе 0,7 от значения полосы пропускания, которая может достигать 18 ГГц (LeCroy SDA 18000), то очевидно, что уже на частотах около 1000 МГц ЦЗО составляет конкуренцию вольтметрам переменного тока или измерителям мощности, имеющим погрешность около 3%. Отметим, что ЦЗО способен производить измерения среднеквадратического значения напряжения сигнала любой формы, а ВЧ-вольтметры переменного тока — только сигнала синусоидальной формы.

На рисунке 1 приведена осциллограмма синусоидального сигнала частотой 350 МГц и уровнем 1 В, полученная на ЦЗО LeCroy WaveRunner WR-6051A с полосой пропускания 500 МГц. Измерения СКО (окно измерения P1) индицируют значение 970 мВ. Погрешность измерения амплитуды в данном случае составляет 3%.

## ИЗМЕРЕНИЕ СРЕДНЕКВАДРАТИЧЕСКОГО ЗНАЧЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ (СКЗ)

Для удобства пользователя ЦЗО компании LeCroy сопровождает осцил-

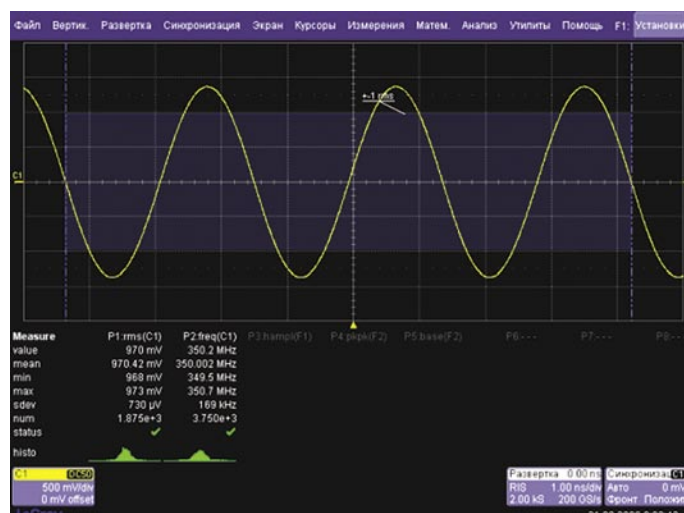


Рис. 1. Измерение синусоидального сигнала частотой 350 МГц и уровнем 1 В

лограмму, на которой производятся измерения, автоматическими маркерами помощи. На рисунке 1 при измерении циклического СКЗ видны маркеры, выделяющие полный цикл (полное число периодов) измеряемого сигнала. Но сигнал, представленный на рисунке 1, достаточно простой. На рисунке 2 приведена осциллограмма одиночного радиоимпульса в режиме измерения циклического СКЗ, видны области измерения СКЗ и результат измерения – 355 мВ. Если же для данного сигнала применить алгоритм полного измерения СКЗ, то результат измерения будет абсолютно другой – 182 мВ. Различия в результатах объясняются тем, что измерение циклического СКЗ происходит в течение длительности импульса, а при измерении полного СКЗ учитываются и участки с нулевым уровнем сигнала. Подобные измерения приобретают наглядность при использовании ЦЗО, способных предоставить дополнительный сервис в виде маркеров, в том числе и горизонтальных, способных индцировать значение СКЗ в виде эквивалентного постоянного напряжения.

Выше уже отмечалось, что средний вольтметр производит измерение амплитуды гораздо более точно, чем цифровой осциллограф. Но это верно лишь для измерения постоянного напряжения или НЧ-напряжения переменного тока синусоидальной формы. При измерении СКЗ сигналов сложной формы погрешность измерения вольтметра увеличивается в зависимости от коэффициента формы сигнала. Для стандартных сигналов коэффициент формы можно учесть при определении дополнительной погрешности измерения напряжения, и погрешность может возрасти в десят-

ки раз. Например, для вольтметра Agilent Technologies 34401 при измерении импульсных сигналов погрешность измерения напряжения может составлять 46%. Для сигналов неизвестной формы коэффициент формы учесть нельзя, поэтому и погрешность измерения напряжения становится неопределенной. ЦЗО производит вычисление среднеквадратического значения формы сигнала из массива данных, полученных в процессе сбора информации, по формуле:

$$СКЗ = \sqrt{\frac{X_1^2 + X_2^2 + X_3^2 + \dots + X_n^2}{n}}$$

где  $X_1; X_2; X_3; \dots; X_n$  – отсчеты амплитуды, полученные в результате дискретизации входного сигнала, а  $n$  – число отсчетов.

Подобный алгоритм вычисления СКЗ не требует дополнительных поправочных коэффициентов. Для однократных и редких сигналов ЦЗО остается единственным средством измерения СКЗ, а также других амплитудных параметров сигнала. Надо учесть, что ЦЗО при измерении СКЗ производит полное измерение сигнала – одновременное измерение как постоянной составляющей (DC), так и переменной составляющей (AC), а большинство вольтметров производит измерения отдельно DC и AC, и лишь некоторые вольтметры способны производить измерения DC+AC. Очевидно, что возможности амплитудных измерений ЦЗО дают пользователю значительные преимущества по сравнению с универсальным вольтметром.

Как ни странно, но даже среди опытных инженеров существует мнение, что цифровой осциллограф

производит измерение напряжения по одному периоду сигнала, но как видно из приведенных выше объяснений, это не соответствует действительности. Для определения различных амплитудных параметров сигнала измерения производятся по всему массиву данных, но в силу особенности измерения амплитудных параметров, осциллограф индцирует только один результат измерения за один проход развертки, поскольку именно это и является циклом измерения. На рисунке 3 приведен пример измерения пикового значения напряжения – разности между минимальным и максимальным значениями сигнала на одной развертке. Следовательно, для вычисления этого параметра необходимо определить как минимальное, так и максимальное значение на всей форме сигнала, а для этого необходим анализ всего массива данных сигнала.

Для обеспечения достоверных и быстрых измерений при большом массиве данных ЦЗО должен обладать достаточным быстродействием для обеспечения необходимых вычислений. И в этой ситуации не все осциллографы ведут себя одинаково. Например, осциллограф LeCroy при длине памяти 10 МБайт и при отсутствии измерений обеспечивает время сбора осциллограмм 210 мс, при включении одного измерения время сбора осциллограммы увеличивается до 340 мс, а при включении четырех одновременных измерений увеличивается до 430 мс. То есть при включении четырех измерений время сбора осциллограмм увеличивается в 2,04 раза. Другие цифровые осциллографы снижают быстродействие в сотни раз.



Рис. 2. Измерение циклического среднеквадратического значения напряжения

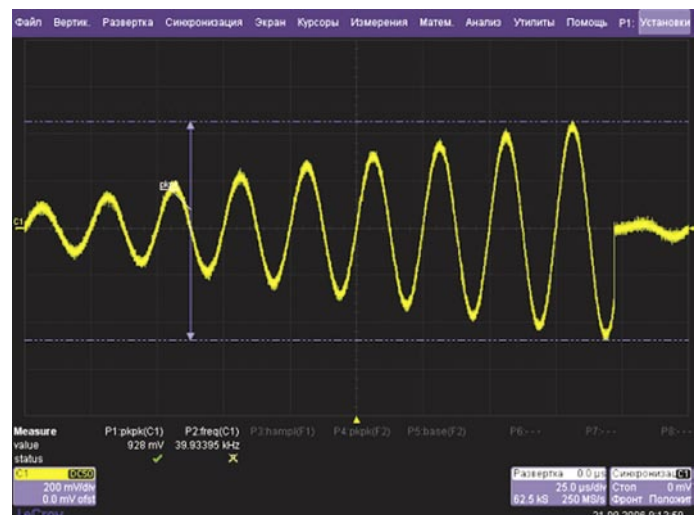


Рис. 3. Измерение пикового значения напряжения

Современные профессиональные ЦЗО, например, LeCroy, в штатной комплектации (без дополнительных опций) могут обеспечить измерения 11 амплитудных параметров.

Зачастую бывает важно провести измерения не по всему массиву данных осциллограммы, но лишь в выделенной области. На рисунке 4 приведен пример сигнала прямоугольной формы с модулированными базой и верхом. На первый взгляд автоматические измерения амплитудных параметров такого сигнала могут вызвать сложности у пользователя, но в ЦЗО LeCroy подобные задачи решаются именно за счет измерения параметров сигнала в выделенной области. Для измерения амплитудных параметров модулирующего сигнала задействуем измерения P1, P2 и P3. Для измерения СКЗ модулирующего сигнала базы (измерения P1) выделяется только часть модулирующего сигнала базы, результат – 147 мВ. Для измерения СКЗ модулирующего сигнала верха (измерения P2) выделяется только часть модулирующего сигнала верха, результат – 1,01 В. Для измерения пикового значения модулирующего сигнала верха (измерения P3) выделяется только часть модулирующего сигнала верха, результат – 482 мВ. Измерения P4 и P5 обеспечивают измерения амплитудных параметров основного прямоугольного сигнала – уровня верха и уровня базы и эти измерения производятся без выделения области.

Таким образом, обеспечивая возможность одновременного измерения до 8 параметров сигнала, осциллографы LeCroy также обеспечивают возможность измерения в 8 различных областях этого сигнала. Справедливости ради отметим, что и другие осциллографы, например,

Tektronix DPO-7000 или DPO-4000, так же дают возможность измерения параметров в выделенной области, но для всех измерений (DPO-7000 это 8 измерений, а для DPO-4000 это 4 измерения) существует всего одна выделенная область, что существенно ограничивает возможности измерения сложных сигналов.

### ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ

Измерения временных параметров – это набор наиболее расширенных и точных видов измерений ЦЗО. В штатной комплектации осциллографа LeCroy способны обеспечить до 69 видов измерения, а при установке дополнительных опций общее число всех видов измерений может достигать 180. Основными отличиями ЦЗО от традиционных аналоговых осциллографов при измерении временных интервалов являются следующие:

1. ЦЗО обеспечивает автоматическое измерение временных параметров (не стоит забывать и про автоматическое измерение амплитудных параметров), аналоговый осциллограф обеспечивает измерения временных интервалов, используя деления временной шкалы на экране.

2. ЦЗО обеспечивает погрешность измерения временных параметров до 0,0001%, а лучшие экземпляры аналоговых осциллографов имеют погрешность измерения всего 0,5% (C1-108).

Погрешность измерения временных параметров ( $\Delta T$ ) ЦЗО определяется погрешностью опорного генератора, частотой дискретизации и собственным джиттером, что может быть выражено формулой:

$$\Delta T = \pm \left( T_{00} + \frac{1}{F_d} + T_{дд} \right) \quad (1)$$



Рис. 4. Измерение значений напряжения в выделенных зонах



**Gembird**  
components

Подробнее на сайте:  
[www.gembirdcomponents.ru](http://www.gembirdcomponents.ru)

**РЕЗИСТОРЫ:**

- Чип-резисторы (0603; 0805; 1206 1% 5%)
- Постоянные резисторы (углеродопленочные; металлопленочные)
- Проволочные цементные
- Резисторные сборки SIP (аналог HP1-4-9M)
- Переменные резисторы

**КВАРЦЫ:**

- Кварцевые резонаторы (корпус стандартный; усеченный; SMD; ПАВ -20/+70°C; -45/+85°C)
- Кварцевые резонаторы часовые
- Керамические резонаторы

**КОНДЕНСАТОРЫ:**

- Электролитические 85°C; 105°C
- Керамические многослойные выводные радиальные MLCC (аналог K10-17B)
- Чип-керамические многослойные (0603, 0805, 1206, 16V, 25V, 50V, 63V)
- Чип-танталовые конденсаторы (A B C D)
- Керамические дисковые

**ДИОДЫ:**

- Диоды Шоттки
- Высокочастотные
- Супербыстодействующие
- Ультрабыстодействующие
- Высокочастотные
- Быстродействующие
- Выпрямительные
- Высоковольтные
- Диоды
- Высокоскоростные переключаемые
- Стабилитроны
- Диодные матрицы
- Диодные мосты
- Светодиоды

**ВАРИСТОРЫ**

**ТРАНЗИСТОРЫ**

Представительство  
Gembird в России:  
тел.: (495) 231-49-89  
e-mail: [info@gembird.ru](mailto:info@gembird.ru)

где  $T_{оп}$  — погрешность установки частоты опорного генератора;  $F_d$  — частота дискретизации;  $T_{дж}$  — собственный джиттер осциллографа.

Для осциллографов LeCroy применение специальных алгоритмов интерполяции при проведении автоматических измерений позволяет снизить влияние частоты дискретизации на погрешность измерения более чем в 16 раз и формула (1) приобретает вид:

$$\Delta T = \pm (T_{оп} + \frac{0,06}{F_d} + T_{дж}) \quad (2),$$

Погрешность современных опорных генераторов составляет 1 ppm в год, частота дискретизации для наиболее массовых моделей ЦЗО составляет 5 Гвыб./с или 10 Гвыб./с, а в режиме эквивалентной дискретизации до 250 Гвыб./с, собственный джиттер ЦЗО удается снизить до значений 3 пс (например SDA-18000). Из этих выкладок следует, что наиболее существенным при определении погрешности измерения временных интервалов как раз и является погрешность установки частоты опорного генератора.

Разные производители при измерении временных интервалов предъявляют дополнительные требования, обеспечивающие достижение декларируемой погрешности измерения. Например, компания Tektronix для своих осциллографов серии TDS-5000B для обеспечения погрешности, указанной в формуле (1), при автоматических измерениях дополнительно требует выполнение следующих параметров:

1. Обеспечить амплитуду сигнала не менее 5 делений;
2. Должен быть установлен режим сбора информации «усреднение», с числом усреднений не менее 100;

3. Результат измерения определяется как среднее из массива данных при накоплении 1000 результатов измерения частоты. Это требование, в общем, тоже понятно, поскольку классический частотомер при измерении частоты имеет такой параметр как «время счета», за это время происходит определение среднего значения частоты за весь период измерения, и чем больше время счета, тем более точный результат можно получить. Поскольку ЦЗО не имеет времени счета при измерении частоты, то эквивалентом этого параметра является накопление статистики измерения частоты.

Производители ЦЗО используют различные алгоритмы автоматического измерения временных интервалов. Большинство производителей, например, Tektronix или Agilent Technologies, используют алгоритм измерения частоты по одному периоду сигнала. При таком алгоритме измерения первое, что приносится в жертву, — время измерения, которое, бесспорно, увеличивается. Так, практические измерения показывают, что для упомянутого выше осциллографа Tektronix серии TDS-5000B (при длине памяти 2000 точек для минимизации временных затрат на вычислительный процесс), измерение частоты 10 МГц, полученной от рубидиевого стандарта частоты с погрешностью воспроизведения  $10^{-10}$ , время измерения, при выполнении всех требований производителя, составляет 1 минута 23 секунды. Компания LeCroy в своих осциллографах использует алгоритм измерения временного интервала не по одному периоду, а по всем периодам сигнала, присутствующим в массиве данных со статистической обработкой.

Кроме того, компания LeCroy для обеспечения погрешности, указанной в формуле (1), дополнительно требует выполнения двух условий:

1. Обеспечить амплитуду сигнала не менее 5 делений;
2. Результат измерения определяется как среднее из массива данных при накоплении 1000 результатов измерения частоты.

Очевидно, что такой алгоритм измерения обеспечивает следующие преимущества:

1. Значительно повышается скорость измерений;
2. Обеспечивается возможность создания и обработки статистических данных, полученных на основе массивов результатов измерений;
3. Возможность получения результатов измерения для динамических сигналов.

Практика показывает, что для накопления статистики и получения достоверного результата при измерении частоты 10 МГц, при частоте дискретизации 5 ГГц, необходимо время 100 мс. Осциллограф LeCroy WR-6051A за время измерения 100 мс обеспечил погрешность измерения 1 ppm (при допустимой погрешности измерения 10 ppm) — рисунок 5.

Практическая ценность измерения временных интервалов по всему числу периодов входного сигнала обусловлена не только увеличением скорости измерений, но и увеличением достоверности измерения — очевидно, что если сигнал имеет вандер (медленная флуктуация во времени), то при достаточно большом времени измерения и тем более при использовании функции усреднения достоверность измерения будет уменьшаться.

Особенности измерения временных интервалов по всей осциллограм-

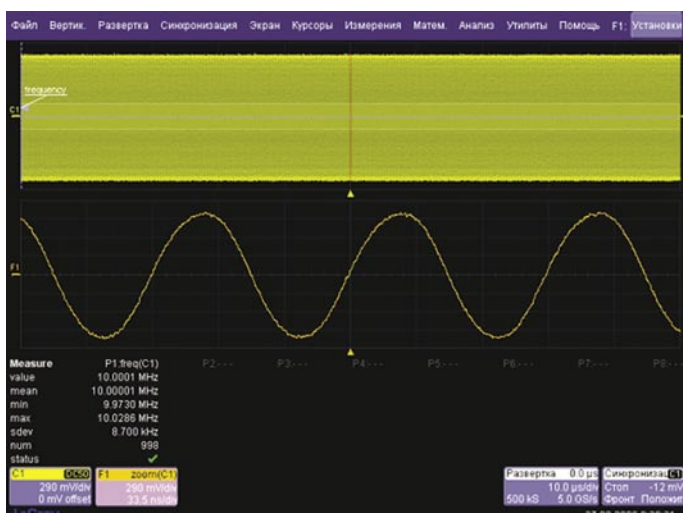


Рис. 5. Измерение частоты синусоидального сигнала



Рис. 6. Измерение частоты сигнала в выделенных зонах

ме и режима измерения в выделенной области дают новые возможности. На рисунке 6 приведен пример частотно-модулированного сигнала (осциллограмма C1) и модулирующего сигнала (осциллограмма C2). Очевидно, что поскольку модулирующий сигнал имеет вид «ступенька», то и частоты в модулируемом сигнале так же изменяются дискретно.

Используя режим измерения частоты осциллограммы C1 для всех восьми измерений P1...P8, с той лишь разницей, что для каждого измерения P1...P8 измерения частоты производятся в пределах выделенного окна равного времени одной ступеньки, возможно измерить частоту модулируемого сигнала, соответствующую каждому уровню модулирующего сигнала.

В заключение обзора «простых» режимов измерения особо отметим, что для получения результатов измерения сложных сигналов иногда недостаточно просто включить тот или иной режим измерения. Комбинирование различных режимов работы ЦЗО, включая математические операции над сигналом, оказывает существенную пользу при измерении параметров сигнала. Так, например, существует задача измерения временных параметров радиоимпульса — частоты заполнения и периода повторения и длительности импульсов. Если для измерения частоты заполнения можно использовать методы, описанные выше, то автоматическое измерение периода повторения и длительности радиоимпульсов может вызвать затруднение. Для решения этой задачи необходимо выделить огибающую радиоимпульса и измерить период повторения и длительность. Огибающую можно выделить, используя математическую функцию «прореживание». Суть метода проиллюстрирована на примере радиоимпульса, представляющего собой пакет синусоидальных колебаний частотой 1 МГц и периодом повторения 1,543 мс. Каждый пакет содержит 428 колебаний частоты 1 МГц (см. рис. 7). На рисунке используются следующие обозначения:

- C1 — осциллограмма исходного сигнала;
- Z1 — растяжка одного пакета исходного сигнала;
- F1 — результат математической обработки функции «прореживание».

Из исходной осциллограммы C1 можно получить следующие результаты:

1. Измерение частоты сигнала заполнения — окно P1;



Рис. 7. Измерение временных параметров радиоимпульса



Рис. 8. Графическое отображение ШИМ сигнала и измеренных временных параметров

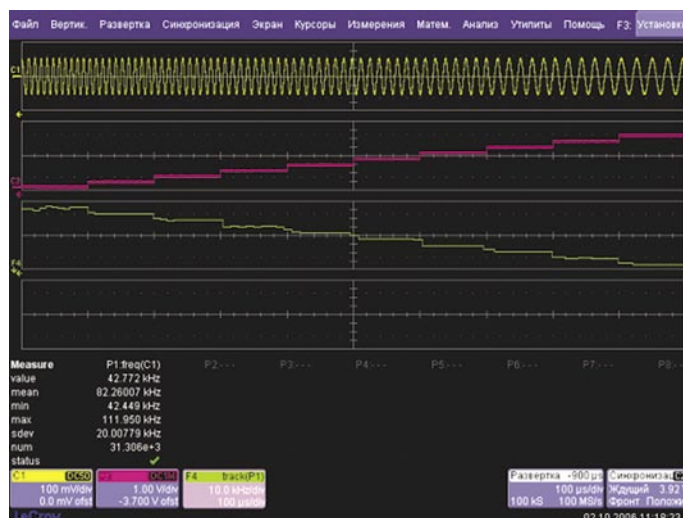


Рис. 9. График слежения частоты сложного ЧМ-сигнала

2. Числа периодов сигнала в одном пакете окно P5.

Из осциллограммы растяжки Z1 можно визуально оценить форму

сигнала заполнения и так же измерить частоту сигнала заполнения (но более точно), результат представлен в окне P2.

Из осциллограммы математики F1 можно получить следующие результаты:

1. Измерение периода повторения радиоимпульсов — окно P3.
2. Длительности одного пакета радиоимпульса, результат представлен в окне P4.

**ПОСТОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ**

В отличие от ЦЗО других производителей, осциллографы LeCroy способны хранить результаты измерения всего массива данных — в зависимости от установленных опций до 6 млн. результатов измерений. Этот массив данных можно представлять в графическом виде, обрабатывать методами математической статистики и индексировать результаты обработки, сохранять их в виде файлов для экспорта в другие программные приложения операционной среды Windows.

**График слежения.** Рассмотрим ШИМ-сигнал, несколько периодов которого отображены на осциллограмме C1 (см. рис. 8). P1 — измерение длительности импульса сигнала C1. Для иллюстрации возможностей режима измерения осциллограмма получена в режиме однократного пуска. Из статистического окна измерения P1 видно, что на всем сигнале произведено 249 измерений длительностей импульса, а поскольку сигнал является динамическим (длительность импульса изменяется во времени), то окно измерения P1 дает только общие представления о длительности импульса — последнее измерение, минимальное значение, максимальное значение и т.д., но не отражает динамики изменения длительности импульса. Осциллографы LeCroy могут формировать из массива дан-

ных так называемый график слежения. Этот график 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 результатов измерения заданного параметра. Таким образом формируется временной график измерений выбранного параметра в пределах одной развертки осциллографа. Из рисунка 8 видно, что ШИМ-сигнал модулируется по закону, близкому к логарифмическому. Используя режим курсорных измерений, возможно произвести измерения длительности сигнала в тех или иных точках и на осциллограмме входного сигнала этим же курсором будет отмечена точка сигнала, соответствующая измеряемой длительности.

Если же вернуться к частотно-модулированному сигналу, приведенному на рисунке 6, и применить график слежения к результатам измерения частоты в пределах всей осциллограммы (см. рис. 9), то полученный график даст более наглядный результат изменения частоты в модулированном сигнале, с учетом динамики изменения сигнала в пределах одной модулирующей ступеньки.

На графике слежения также возможно произвести различные автоматические измерения, характеризующие изменение выбранного параметра. Например, на рисунке 10 осциллограмма C1 представляет собой частотно-модулированный сигнал с несущей 1 МГц, девиацией 200 кГц и частотой модулируемого синусоидального сигнала 1,234 кГц. Осциллограмма F4 — график слежения изменения частоты в сигнале C1, осциллограмма F1 отображает форму

модулирующего сигнала. Используя автоматические измерения для данного графика, можно определить: минимальное значение частоты (P4 = 800 кГц), максимальное значение частоты (P3 = 1,1999 МГц) и частоту модулирующего сигнала (P2 = 1,233 кГц). Полученные результаты совпадают с заданными параметрами ЧМ-сигнала.

График слежения образуется из массива измерения амплитудных или временных измерений и позволяет визуально отследить изменения выбранного параметра в пределах одной развертки, используя курсоры, можно получить результаты измерения выбранного параметра в точке нахождения курсора, но все же график не является реальным массивом результатов измерения. Учитывая алгоритм амплитудных измерений (один полученный результат из одного прохода развертки осциллографа), график слежения обеспечивает наглядное отображение только временных измерений, при индикации амплитудных измерений график слежения сводится в одну точку, как раз и являющуюся результатом измерений. Реальный массив измерений в графическом виде в осциллографах LeCroy может быть представлен так называемым трендом. Последний представляет собой функцию, в которой на горизонтальной оси (ось X) проставляется номер измерения — 1, 2, 3, 4, ... n, (эта ось не связана с временной осью развертки осциллографа), а по оси Y располагаются значения результата измерения выбранного параметра. Отметим отличия тренда от графика слежения.

1. Тренд строится по любому выбранному виду измерения — амплитудному, временному или вспомога-

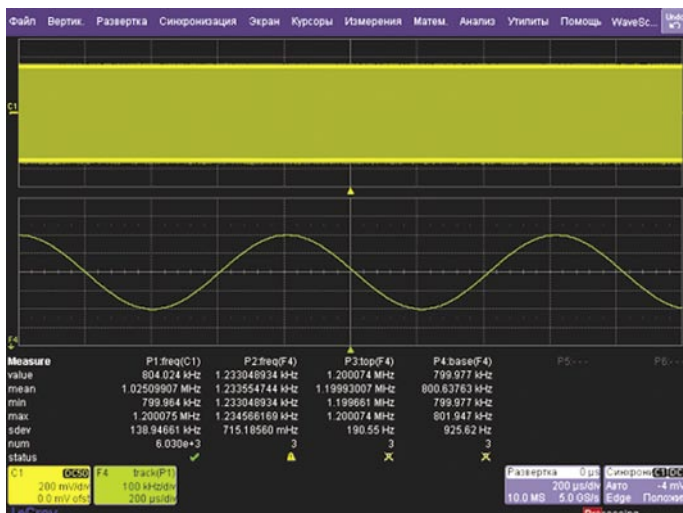


Рис. 10. График слежения частоты ЧМ сигнала и измерение параметров модуляции



Рис. 11. График слежения и тренд длительности двоичного сигнала

тельному. График слежения строится только по временным измерениям.

2. Тренд состоит только из реальных точек значений результатов измерений и представляет собой развернутый массив данных результатов измерений. Число точек тренда задается пользователем и может составлять от 1 до 6 миллионов (в зависимости от типа ЦЗО и установленных опций).

3. В зависимости от выбранного режима, тренд строится по результатам измерения одного прохода развертки или по всем значениям, полученным в результате измерений.

4. При сохранении тренда в файл сохраняется весь выбранный массив результатов измерений с указанием номера измерения. Далее эти данные можно использовать для обработки внешними средствами.

5. Тренд не имеет возможности регистрации значений, находящихся в пределах указанного допуска, он отображает все значения результата измерения.

Например, при построении тренда и графика слежения для измеренных значений длительности импульса в нерегулярной последовательности в пределах одной развертки, тренд и график слежения практически совпадают по форме (см. рис. 11). Разница состоит в том, что график слежения отображает изменение длительности импульсов во времени и имеет более сглаженный вид, а тренд отображает измеренное значение длительности импульса и имеет более «остроконечный» вид.

Практическая ценность тренда заключается в возможности не только кратковременной, но и длительной регистрации и индикации результатов измерений. В этом случае тренд будет выглядеть как регистрация данных на бумажном самописце, но без меток реального времени. При необходимости изменение интервала регистрации производится изменением настроек схемы синхронизации, например, установкой задержки синхронизации по числу событий. Это позволяет регистрировать, отображать и анализировать медленные измерения тех или иных параметров входного сигнала. На рисунке 12 осциллограмма F1 представляет тренд изменения частоты входного сигнала C1, полученный из массива измерения частоты P1.

Тренд также возможно использовать для измерения АЧХ устройств. Для этого достаточно синхронизировать процесс изменения частоты на генераторе тестового сигнала с разверткой осциллографа, произвести измерения амплитуды и частоты на

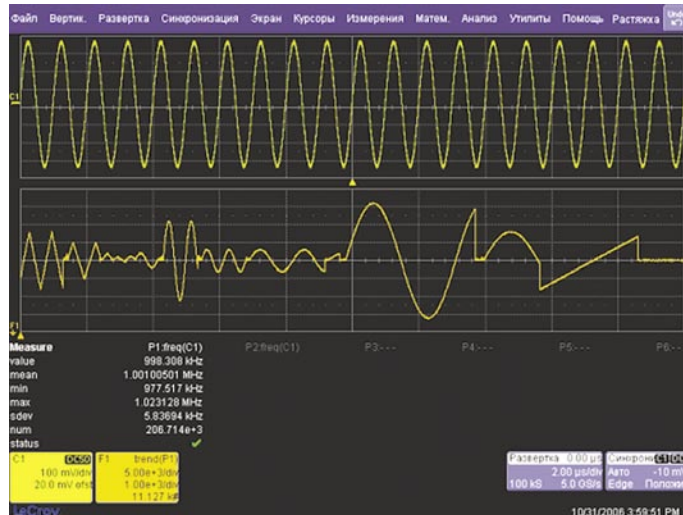


Рис. 12. Тренд медленного изменения частоты исходного сигнала

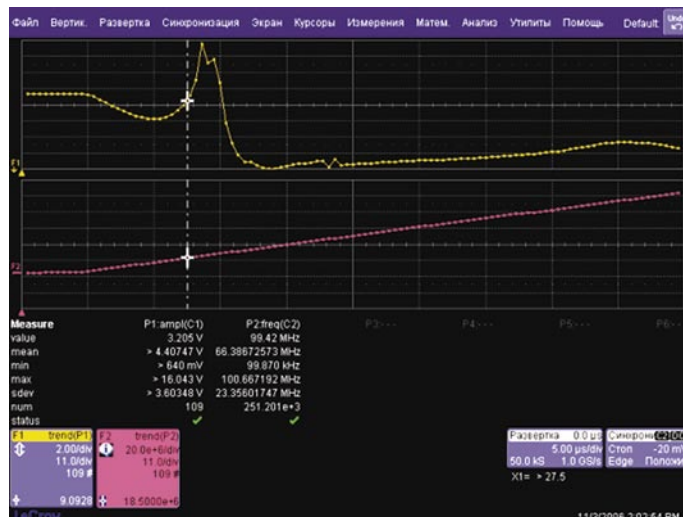


Рис. 13. Измерение АЧХ устройства с применением трендов

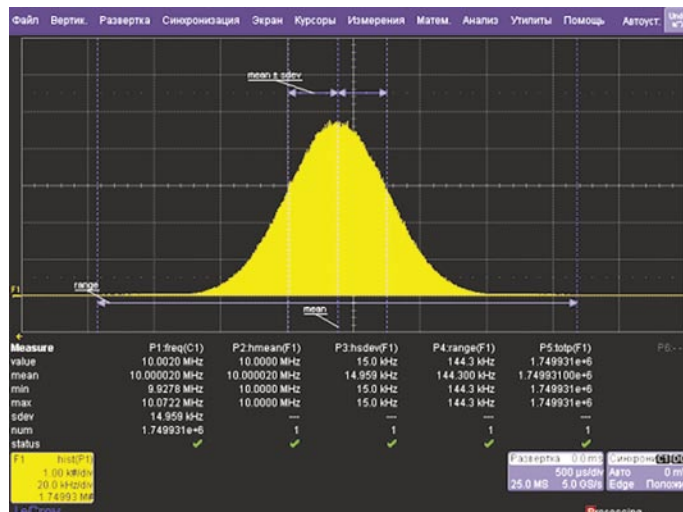


Рис. 14. Гистограмма нормального закона распределения при измерении стабильной частоты



Рис. 15. Гистограмма измерения частоты ЧМ-сигнала

выходе устройства. И по полученным результатам построить тренд изменения амплитуды, что и будет являться АЧХ устройства. Синхронный тренд изменения частоты предназначен для формирования частотных меток АЧХ. На рисунке 13 осциллограмма F1 представляет собой АЧХ устройства в диапазоне частот от 100 кГц до 100 МГц. Осциллограмма F2, являющаяся трендом частоты, идентифицирует частотный диапазон АЧХ.

Возможности построения, анализа и измерения гистограмм выгодно отличают ЦЗО LeCroy и превращают их в мощный аналитический инструмент. Гистограмма – график, отображающий степень повторяемости данных в больших массивах – позволяет сжать гигантский размер данных в компактный график, удобный для анализа и при визуальной оценке. В случае ЦЗО массивом данных является массив данных измерения выбранного параметра. Для примера на рисунке 14 приведена гистограмма измерения сигнала частотой 10 МГц (сам исходный сигнал на рисунке отсутствует). Данные, по которым построена гистограмма, собраны при измерении

частоты P1 и представляют собой массив размером более 6 млн. значений измерений частоты. Поскольку сигнал является стабильным и изменения частоты не происходит, то разброс значений частоты вызван естественными причинами хаотического рода. Такая гистограмма является классической и называется нормальной или Гауссовой. Непрерывная случайная величина X имеет нормальный закон распределения с параметрами α (среднее значение) и σ (сигма или стандартное отклонение), если ее плотность вероятности f(x) имеет вид:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\alpha)^2}{2\sigma^2}}$$

Основными параметрами гистограммы являются:

- 1) α – среднее значение;
- 2) σ – сигма или стандартное отклонение;
- 3) диапазон гистограммы;
- 4) плотность заполнения.

Поскольку гистограмма строится из массива измерения, то основные параметры гистограммы связаны со статистическими данными результатов измерений.

1. α – центральная, наиболее вероятная часть гистограммы и измеренное среднее значение гистограммы 10,0002 МГц (см. рис. 15), маркер mean и измерение P2 равно среднему измеренному значению частоты в измерении P1 10,0002 МГц (значение mean).

2. σ – диапазон, в котором сосредоточено 68% всех полученных измеренных значений. Он равен среднему значению гистограммы ±σ. На рисунке 15 обозначен маркерами mean ± sdev. Значение стандартного отклонения гистограммы P3 14,959 кГц равно стандартному отклонению измерения частоты P1 (значение sdev = 14,959 кГц). Для сигналов с нулевым средним значением стандартное отклонение равно среднеквадратическому значению (СКЗ) измеренного параметра.

3. Диапазон гистограммы – горизонтальный диапазон, в котором сосредоточены все значения гистограммы. Физическая интерпретация диапазона гистограммы – это разность между максимальным и минимальным значениями во всем массиве измерений. На рисунке 15 диапазон гистограммы обозначен маркерами range, а его измеренное значение представлено в поле P4. Его значение 144,3 кГц совпадает с разностью между максимальным и минимальным значениями P1 (в поле P1 в явном виде не представлено).

4. Плотность заполнения – общее число измерений. Измеренное значение плотности гистограммы P5 совпадает с числом измерений, индицируемым в поле измерений P1, и составляет в обоих случаях 1,749931 млн. измерений.

Итак, гистограмма, формируемая ЦЗО, способна преобразовать большой объем информации в очень компактный формат, который может быть легко измерен и проанализирован методами математической статистики.

ООО СМП

ИНТЕРНЕТ-МАГАЗИН  
[www.SMD.ru](http://www.SMD.ru)

электронные компоненты для поверхностного монтажа

НОВОЕ В ПРОГРАММЕ ПОСТАВОК

Кварцевые резонаторы 5×3,2 мм  
Аудио SMD-разъем 3,5 мм стерео

Москва, ул. Балтийская, 13; e-mail: [sale@smd.ru](mailto:sale@smd.ru)  
Тел.: (495) 158-73-96, 943-87-80, 940-62-44

**ALTEX**  
ISO 9001:2001, CE, T11, BT

Электронные компоненты от более 50 мировых производителей

SKYWORKS

Excelsior

Mini-Circuits

FUJITSU

M/A-COM

MITSUBISHI

ENERGY

RFIC

KODAK

e2V

Hitachi

Agilent Technologies

CYPRESS

ADTEK

TOSHIBA

SIRENZA

SONY

**Контакты:**  
Адрес: Москва, Зеленоград, Панфиловский проспект, 1145, офис В  
Телефон: (495) 755-7733, 530-5653  
Телефон/факс: (495) 530-7961  
E-mail: [info@altex-com.ru](mailto:info@altex-com.ru)  
Web: [www.altex-com.ru](http://www.altex-com.ru)