Развитие серии генераторов произвольных функций AFG3000 компании Tektronix и их применение

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

Современные измерительные генераторы произвольных функций и сигналов строятся на основе прямого цифрового синтеза формы сигналов. К числу лучших из них относятся генераторы серии AFG3000 компании Tektronix. В статье описаны генераторы этой серии. В частности, впервые приведены данные о версиях микропрограммного обеспечения генераторов и спектре основных видов генерируемых ими сигналов. Сделан обзор их типовых применений.

Генераторы с прямым цифровым синтезом сигналов типа AFG

Современные генераторы сигналов серии AFG3000 фирмы Tektronix относятся к категории генераторов произвольных функций (Arbitrary Functions Generations) (рис. 1). Они выполняют также роль функциональных генераторов и генераторов качающейся частоты, работающих в очень широком диапазоне частот — от нескольких мкГц до 240 МГц. Размеры приборов — 156×329×168 мм, вес — 4,5 кг. Исполнение приборов настольное и для монтажа в стойку. Электропитание — 200–240 В с частотой 47–63 Гц и 100–115 В с частотой 300–440 Гц, потребляемая мощность — 120 Вт.

Приборы выполнены на основе специализированной однокристальной интегральной микросхемы, изготовленной по КМОП-технологии с разрешением 0,18 мкм и реализующей прямой цифровой синтез (Direct Digital Synthesis, DDS) формы и частоты генерируемых колебаний. При умеренной для приборов этого класса цене они превосходят генераторы других фирм по скорости дискретизации (250 Мвыб/с, 1 Гвыб/с и 2 Гвыб/с) и максимальной частоте генерации (для синусоидального сигнала — до 240 МГц).

Генераторы имеют современный, простой и наглядный интерфейс, подобный тому, что применяется в цифровых осциллографах. На большом жидкокристаллическом цветном дисплее (только у модели AFG3021 он черно-белый) с размером по диагонали 5,6 дюйма отображаются крупными знаками основные параметры сигналов, режимы их работы и характерная форма создаваемых сигналов. Поддерживается 8 языков интерфейса, включая русский. Имеется экранная справка.

На задней панели генератора расположены разъем электропитания, защитный порт Security Port, гнездо заземления, разъем сигнала, добавляемого к основному сигналу, ADD INPUT, разъемы внешней модуляции сигналов EXT MODULATION CH1/CH2, входной EXT REF INPUT и выходной EXT REF OUTPUT разъемы опорной (эталонной) частоты. Все эти разъемы стандартные, коаксиальные, типа BNC. Кроме того, имеются разъемы портов USB и GPIB, сети LAN.

Функциональная схема генераторов сигналов типа AFG

Генерация сигналов в этом новейшем поколении цифровых генераторов основана на ис-

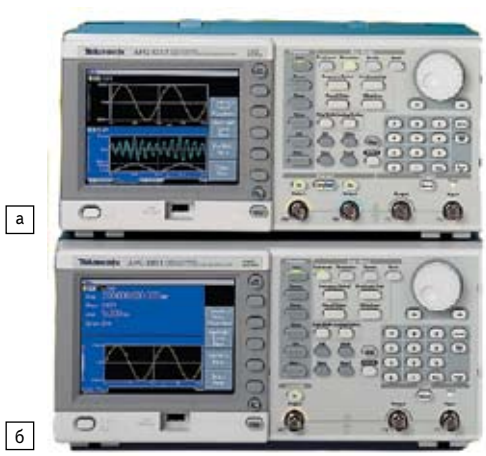

Рис. 1. Внешний вид генераторов Tektronix AFG3000:
а) двухканальная модель; б) одноканальная модель

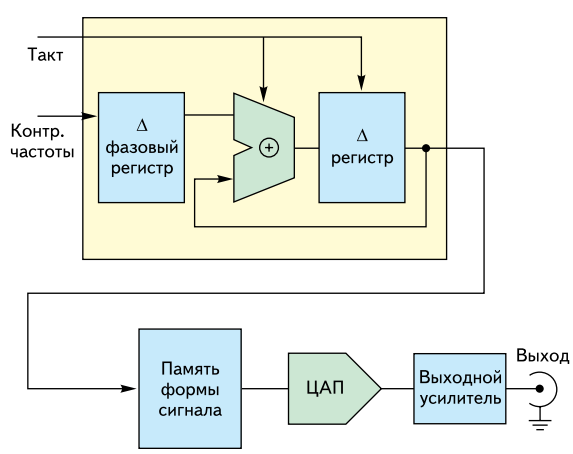

Рис. 2. Функциональная схема одноканального генератора AFG, использующего прямой цифровой синтез сигналов

пользовании заранее подготовленных и хранящихся в памяти оцифрованных N выборок сигнала за его один период (рис. 2). Типичное число выборок составляет от единиц до многих тысяч. Каждая выборка представляет значение сигнала в виде числа с некоторой разрядностью 14 бит. Такт работы задается высокостабильным кварцевым генератором.

Генерация сигнала заданной формы с точно заданной частотой основана на выработке адреса отсчетов сигнала с фиксацией дискретного фазового сдвига с помощью Δ-фазового регистра и уровня сигнала с помощью Δ-регистра. Как только набегает фазовый сдвиг 360°, выработка адреса прекращается (в режиме единичного запуска) или возобновляется заново (в непрерывном режиме или в режиме генерации пачки сигналов). Двухканальные генераторы при общей памяти сигналов имеют два канала выборки и два выходных усилителя.

Специфика цифрового синтеза сигналов

Переход к цифровым методам синтеза сигналов позволяет добиться значительного расширения диапазона частот, повышения стабильности частоты сигналов и задания любой формы сигналов. Но он ведет и к некоторым специфическим особенностям синтезированных сигналов. Их суть поясняет рис. 3.

После преобразования каждого оцифрованного отсчета в аналоговый с помощью цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) получается последовательность аналоговых отсчетов — импульсов с амплитудой, равной амплитуде аналогового сигнала. Запоминающий конденсатор обеспечивает формирование ступенчатого (квантованного сигнала) (рис. 4).

Разность между идеальным сигналом на выходе генератора (рис. 4а) и реальным сигналом (рис. 4б), показанная на рис. 4в, называется шумом квантования и определяется как:

$$e(t) = s(t) - s_к(t). \quad (1)$$

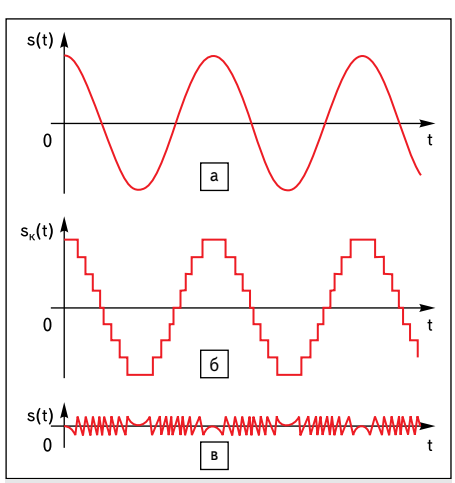

Рис. 4. а) Идеальный синусоидальный сигнал; б) реальный сигнал на выходе ЦАП с запоминанием; в) шум квантования

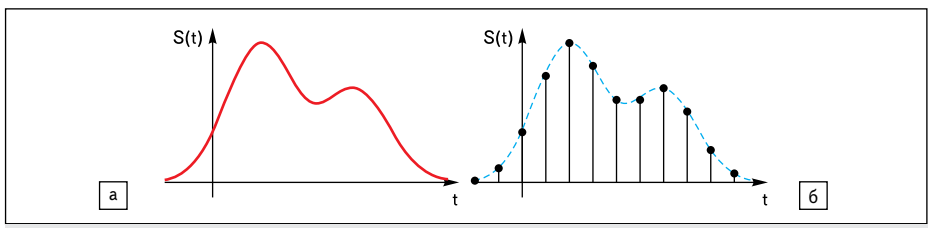

Рис. 3. Синтезированный сигнал:
а) в идеале; б) его дискретные отсчеты, взятые из памяти (их интерполяция — пунктирная кривая)

На рис. 4 видно, что амплитуда шумового сигнала составляет не более половины амплитуды ступеньки Δ. В общем случае положение ступенек от цикла к циклу сигнала имеет случайный характер, а потому $e(t)$ воспринимается как шум.

Если считать, что $e(t)$ описывается случайным законом с равномерным распределением в пределах от –Δ/2 до Δ/2, то среднее значение сигнала шума будет нулевым, а дисперсия равна Δ2/12. Это позволяет оценить важный шумовой параметр генераторов с цифровым синтезом сигнала — отношение сигнал/шум (signal-to-noise ratio):

$$SNR = \frac{A}{\sqrt{\Delta^2/12}} = \frac{2A\sqrt{3}}{\Delta} = N\sqrt{3}, \quad (2)$$

где $N = 2A/\Delta$ — число ступенек квантования, которые укладываются на двойной размах синтезируемого сигнала.

Если ЦАП имеет p двоичных разрядов, обеспечивающих $N = 2^p$ уровней квантования, то параметр SNR можно записать в виде:

$$SNR = 2^p\sqrt{3}. \quad (3)$$

Отношение сигнал/шум можно выразить также в дБ:

$$SNR_{дБ} = 20\log(2^p\sqrt{3}) = \\ = 20p\log(2)+10\log(2) = 6p+4{,}77 \text{ дБ}. \quad (4)$$

Например, при 8-разрядном кодировании $SNR_{дБ}$ = 52,77 дБ, а при 14-разрядном — 88,77 дБ. На рис. 4в видно, что шум создается сигналом, средняя частота которого равна частоте квантования $f_k = 1/\Delta_t$, где Δ_t — шаг квантования, который в N раз меньше периода синусоидального сигнала на выходе генератора. Это позволяет существенно уменьшить шум квантования, если вырезать режекторным фильтром область спектра сигнала в районе частоты $f_к$. Другой путь уменьшения шумов квантования заключается в применении интерполяции на основе базиса Котельникова — функции вида sin(x)/x.

Фазовый шум генераторов

В технике генерации синусоидальных сигналов большое значение имеет фазовый шум генераторов, создаваемый случайными флуктуациями частоты или фазы сигнала. Обычно уровень фазовых шумов источника синусоидальных сигналов измеряется спектральным методом, при котором уровень шума при отстройке от несущей на частоту f_m оценивается выражением:

$$L(f_m) = P_0 - \left[P_{noise,f_m} - 10\log\frac{B_{noise}}{\text{Гц}} + D_{корр}\right], \quad (5)$$

где P_0 — мощность несущей сигнала, P_{noise,f_m} — мощность фазовых шумов при отстройке по частоте f_m, B_{noise} — шумовая полоса узкополосного фильтра анализатора, D_{korr} — коэффициент корректировки. Типичное значение фазового шума у генераторов AFG3000 на частоте 20 МГц составляет –110 дБ при отстройке от несущей на 10 кГц и размахе синусоидального сигнала 1 Вп-п (межпиковое напряжение).

Состав серии генераторов AFG3000

Вначале была выпущена серия из шести генераторов (табл. 1). Два первых генератора имели только USB-порт, остальные были оборудованы также портами LAN (локальной сети) и GPIB (приборный порт). В дальнейшем они были заменены моделями AFG3021B и AFG3022B с добавленными в них портами LAN и GPIB. Наконец, недавно появилась модель AFG3011 с удвоенной амплитудой выходного напряжения — до двойной амплитуды в 20 Вп-п на нагрузке 50 Ом и 40 Вп-п на высокоомной нагрузке.

Повышение амплитуды выходного сигнала далось большой ценой: несмотря на ограничение максимальной частоты синусоидального сигнала значением всего в 10 МГц, «высоковольтный» генератор AFG3101 стоит почти вдвое дороже ближайшей модели — AFG3021B.

Встроенное микропрограммное обеспечение и его замена

Важным моментом в использовании генераторов серии AFG3000 является возможность обновления их микропрограммного обеспечения — Firmware — из Интернета. Это обеспечивает планомерное обновление генераторов, порою существенное улучшение их характеристик и устранение, увы, довольно многочисленных, ошибок и неточностей в их работе.

Таблица 1. Основные характеристики базовой серии генераторов AFG3000

Характеристики	Параметры	AFG3021/AFG3022	AFG3101/AFG3102	AFG3251/AFG3522
Выходные параметры	Количество каналов	1/2	1/2	1/2
	Виды выходного сигнала	Синус, меандр, импульс, пила, треугольник, sin*x*/*x*, нарастающая и спадающая экспонента, функции Гаусса, Лоренца, Хевисайда, шум		
	Выходной уровень на нагрузке 50 Ом	10 мВ – 10 В	20 мВ – 10 В	50 мВ – 5 В (до 200 МГц) 50 мВ – 4 В (свыше 200 МГц)
	Погрешность установки частоты	$\pm 1\times10^{-5}$		
	Постоянное смещение	±5 Впик (AC+DC)		±2,5 Впик (AC+DC)
Синусоида	Частотный диапазон	1 мГц – 25 МГц	1 мГц – 100 МГц	1 мГц – 240 МГц
	Погрешность установки уровня на 1 кГц	± (1%+1 мВ)		
	Неравномерность АЧХ	±0,15 дБ до 5 МГц ±0,3 дБ до 20 МГц ±0,5 дБ до 25 МГц	±0,15 дБ до 5 МГц ±0,3 дБ до 25 МГц ±0,5 дБ до 100 МГц	±0,15 дБ до 5 МГц ±0,3 дБ до 25 МГц ±0,5 дБ до 100 МГц ±0,1 дБ до 200 МГц
	Коэффициент гармоник (выходной сигнал 1 В)	≤ –70 дБн до 20 кГц < –60 дБн до 1 МГц < –50 дБн до 10 МГц < –40 дБн до 25 МГц	≤ –60 дБн до 20 кГц < –60 дБн до 1 МГц < –37 дБн до 100 МГц	≤ –60 дБн до 20 кГц < –60 дБн до 1 МГц < –50 дБн до 5 МГц < –37 дБн до 25 МГц < –30 дБн до 240 МГц
Меандр	Диапазон частот	1 мГц – 12,5 МГц	1 мГц – 50 МГц	1 мГц – 120 МГц
	Время нарастания/спада, нс	18	5	2,5
Импульс	Диапазон частот	1 мГц – 12,5 МГц	1 мГц – 50 МГц	1 мГц – 120 МГц
	Длительность	30 нс – 999 с	8 нс – 999 с	4 нс – 999 с
	Перестраиваемое время нарастания	18 нс – 625 с	5 нс – 625 с	2,5 нс – 625 с
Дополнительные сигналы	Диапазон частот	1 мГц – 250 кГц	1 мГц – 1 МГц	1 мГц – 2,4 МГц
	Полоса шумового сигнала, МГц	25	100	240
Произвольная форма	Диапазон частот	1 мГц – 12,5 МГц	1 мГц – 50 МГц	1 мГц – 120 МГц
	Частота дискретизации и объем памяти	250 МГц, 2–64 кбайт	250 МГц, 16–128 кбайт 1 ГГц, 2–16 кбайт	250 МГц, 16–128 кбайт 2 ГГц, 2–16 кбайт
	Разрешение по вертикали, бит	14		
Модуляция	Виды модуляции	АМ (0–120%), ЧМ (девиация до 120 МГц), ФМ (0–180°), ЧМн, модуляция длительности импульса (0–50% от периода), ИМ, ГКЧ (линейное/логарифмическое, время качания 10 мс – 100 с)		
	Несущая	Все виды сигналов, кроме импульса, шума и постоянного напряжения		
	Модулирующая	Частота: 2 мГц – 50 кГц; синус, меандр, пила, шум, произвольный сигнал		

Для смены микропрограммного обеспечения следует с сайта компании Tektronix скачать ZIP-файл Firmware. Например, последний (от 28.07.2009) tekafgtb.tfb после распаковки имеет размер 4,442 Мбайт. Распакованный файл размещается в основной директории карты флэш-памяти, после чего она вставляется в гнездо в передней панели, затем с помощью кнопки «Сервис» (Utility) и ее меню запускается команда обновления. Важно во время этого процесса (он занимает несколько минут) не выключать генератор и не вынимать карту флэш-памяти. По завершении обновления надо выключить генератор и снова его включить: начнется его запуск с новым Firmware.

Поскольку в пользовании находятся генераторы с разным Firmware, отметим особенности его версий.

Версия 1.1.0

Начиная с этой версии была обеспечена поддержка в интерфейсе и справке русского языка. Исправлены ошибки в сообщениях справки на ряде языков. Устранены погрешности при установке модуляции и внешнего запуска, а также при выполнении команд кнопкой Save/Recall. Обеспечена операция замены фирменного программного обеспечения только при наличии его файла на карте флэш-памяти.

Версия 1.1.3

Устранены ошибки, связанные с разрядностью задания сигналов произвольной формы, которые наблюдались в моделях генераторов AFG3101, AFG3102, AFG3251 и AFG3252. Устранены погрешности при внешнем запуске генераторов в режиме генерации импульсов и моностабильном режиме.

Версия 1.2.0

Одно из самых серьезных улучшений генераторов. Минимальная частота генерации (за исключением импульсного сигнала) понижена в 1000 раз и доведена до 1 мкГц (была 1 мГц). Разрешение установки по частоте также доведено до 1 мкГц. Разрешающая способность при установке длительности импульса увеличена с 4 до 5 цифр. Увеличен диапазон значений установки асимметрии импульсов — от 0,001 до 99,999% (было от 0,1 до 99,9%). Это заметно расширяет возможности в генерации импульсов. Устранена ошибка при задании логарифмического закона качания частоты. Обеспечена защита установок генератора с помощью пароля. Всего устранено около 20 ошибок и погрешностей в работе генераторов.

Версия 1.2.1

Усовершенствована функция калибровки генератора — Self Calibration. Она стала работать более корректно.

Версия 2.0.0

Обеспечена поддержка моделей генераторов AFG3021B и AFG3022B — средних в группе с полным набором интерфейсов. За счет экстраполяции более реалистичным стало представление формы произвольных сигналов на экране дисплея прибора. Устранены погрешности отображения сигналов с широтно-импульсной модуляцией (PWM).

Версия 2.1.0

Минимальный интервал между запусками был снижен до 1 мкс (был 1 мс). Улучшено отображение формы модулированного сигнала. Устранена замеченная ошибка — неспособность читать некоторые USB блоки памяти. Улучшена работа ручного запуска, в частности устранена иногда возникающая блокировка прибора при нажатии кнопки ручного запуска. Всего устранено 10 ошибок и неточностей.

Версия 3.0.0

Начиная с этой версии поддерживается новая модель AFG3011 с повышенным до 20 В (на нагрузке 50 Ом) размахом выходного напряжения. Обеспечено сохранение копии экрана (команда CopyScreen) при одновременном нажатии кнопок со стрелками под поворотной ручкой. Это очень полезная команда для документирования операций работы с генераторами. В частности, она неоднократно применялась при подготовке этой статьи. Копия экрана сохраняется во флэш-карте памяти в виде файла с расширением .bmp. Двухканальные модели теперь можно сконфигурировать так, что канал CH2 будет инвертированной копией канала CH1. Это упрощает создание дифференциальных сигналов. Исправлена неточная форма сигнала в режиме качания частоты Sweep. Исправлено множество мелких неточностей и ошибок: достаточно отметить, что их перечень содержит 33 наименования. Многие относятся к дистанционному управлению генератором.

Версия 3.0.1

Для генераторов AFG3022B устранено расхождение сигналов между каналами. У двухканальных генераторов устранены небольшие неточности в установке начальной фазы и небольшие (около 0,2%) нестабильности амплитуды для синусоидального и треугольного сигналов при их низких частотах.

Версия 3.1.0

Расширены пределы установки фазового сдвига. Теперь они составляют от –360° до +360° (были от –180° до +180°). Устранена неточность установки сдвига (offset) для синусоидальной функции.

Версия 3.1.1

Это последняя на момент подготовки данной статьи версия Firmware. В ней устранена неточность в задании сдвига (offset) синусоидальной функции в генераторах AFG3011.

Некоторые особенности генераторов AFG3000

Управление генератором, в основном, кнопочное. Верхний ряд кнопок задает режим работы (непрерывный, модуляция и др.), а левый ряд — функцию (синус, прямоугольная и др.). Есть удобная поворотная ручка универсального манипулятора с кнопками

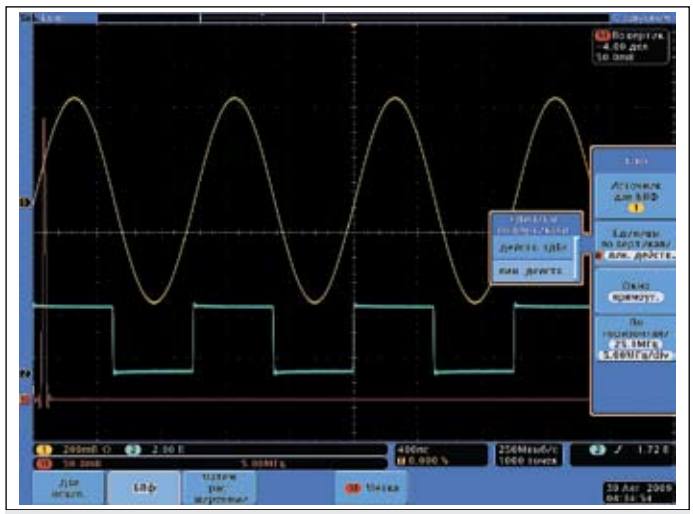

Рис. 6. Осциллограммы выходного синусоидального сигнала генератора AFG3101, его спектра и сигнала с выхода синхронизации

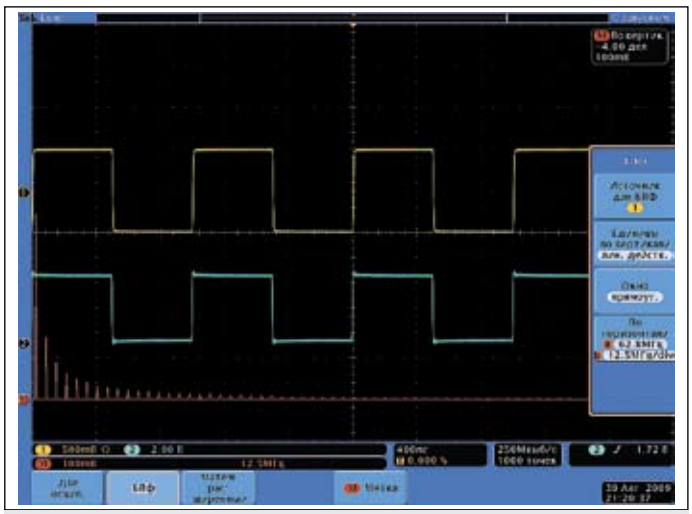

Рис. 7. Осциллограммы меандра, его спектра и сигнала с выхода синхронизации

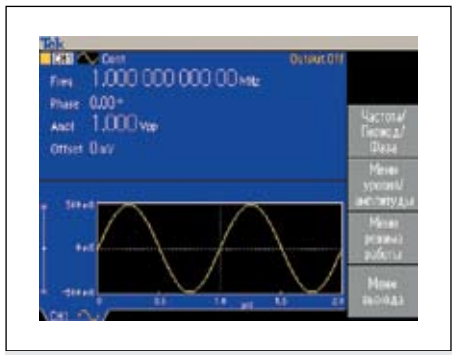

Рис. 5. Дисплей генератора серии AFG3101 сразу после включения

направления (в правом верхнем углу передней панели). Эти кнопки используются для перемещения по разряду числа того или иного параметра, например, частоты, после чего поворотная ручка позволяет быстро менять число с выбранным разрядом. Пример: частота 20.00000000000 MHz (частота 20 МГц) меняется изменением сотых долей МГц (сотая часть числа подчеркивается снизу). Это очень удобно при имитации плавного изменения того или иного параметра.

Работа с прибором сводится к установке режима работы (по умолчанию это непрерывный режим) и вида генерируемого сигнала (по умолчанию синусоидальный). После этого с помощью кнопок контекстного меню или кнопок установки параметров задаются и контролируются на дисплее (рис. 5) параметры генерируемого сигнала.

Основные выходы сигнала (или выход в одноканальной модели) генератора изолированы от «земли» приборов, так что генератор можно использовать как «подвешенный» источник сигналов (или как два источника в двухканальных генераторах). Однако максимальное напряжение (постоянное плюс импульсное) относительно его внутренней «земли» не должно превышать ±42 В.

Генерация синусоидальных сигналов

Для оценки качества синусоидального сигнала воспользуемся 1-ГГц осциллографом DPO4101, имеющим режим анализатора спектра. На рис. 6 показаны осциллограммы выходного синусоидального сигнала генератора и прямоугольных импульсов с его выхода синхронизации. Под ними красной линией показан спектр сигнала. Качество синусоидального сигнала выглядит превосходным: даже малейших намеков на искажение формы не видно. Это подтверждает и спектр сигнала: он представлен лишь одним большим пиком на частоте сигнала. Высшие гармоники в спектре не видны, и это говорит о чистоте синусоидального сигнала. Впрочем, переведя спектральный анализ с линейного в логарифмический масштаб, можно наблюдать и оценить очень небольшие по уровню высшие гармоники.

Генерация прямоугольных сигналов

Максимальная частота прямоугольных сигналов составляет половину от максимальной частоты синусоидальных сигналов. По умолчанию генерируются прямоугольные симметричные импульсы — меандр. Их осциллограмма и спектр показаны на рис. 7. Спектр меандра полностью соответствует теоретическому: он состоит из первой и нечетных гармоник, амплитуды которых пропорциональны $1/n$, где n — номер гармоники.

Генерация импульсных сигналов

Вид экрана генератора при генерации импульсных сигналов показан на рис. 8. Можно устанавливать задержку Delay, длительность

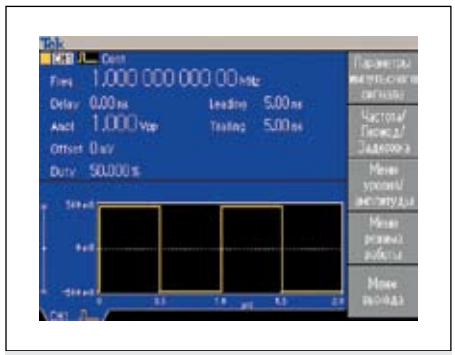

Рис. 8. Вид экрана генератора при генерации импульсных сигналов

Width, длительность переднего фронта Leading, длительность заднего фронта Trailing и коэффициент заполнения Duty (это обратная величина скважности), как и частоту, сдвиг сигнала по уровню, амплитуду или верхний и нижний уровни. Амплитудные параметры можно задавать в В, мВ и дБм (децибелл мощности). Возможны установки времен задержки, нарастания, спада и длительности импульсов. Таким образом, в этом режиме устройство становится полноценным генератором импульсов.

По умолчанию установлен импульсный сигнал в виде меандра. На рис. 9 показана осциллограмма прямоугольного импульса со скважностью 10%. Спектр этого сигнала также соответствует теоретическому: в нем появляются четные гармоники, при этом на частотах $1/t_и$, где $t_и$ — длительность импульса, гармоники имеют нулевую амплитуду.

Генерация пилообразных сигналов

Пилообразные сигналы могут быть симметричными и несимметричными. По умолчанию генерируются симметричные

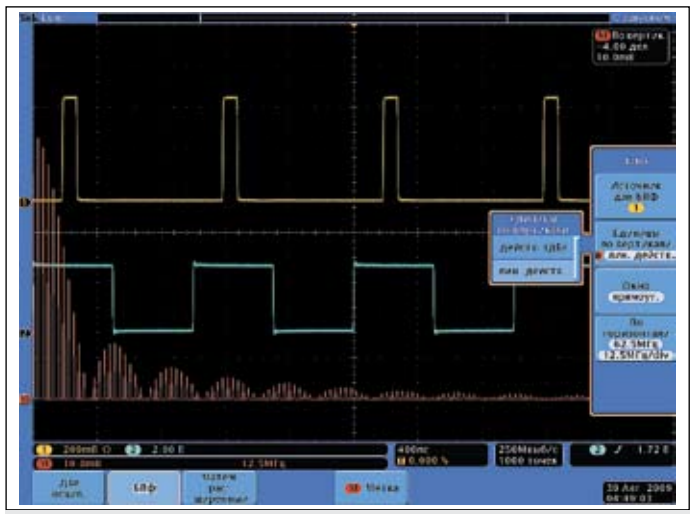

Рис. 9. Осциллограммы прямоугольного импульса с коэффициентом заполнения 10%, его спектра и сигнала с выхода синхронизации

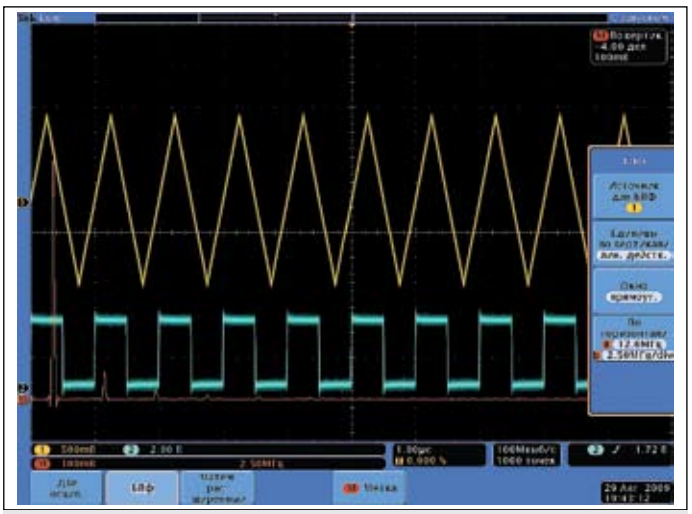

Рис. 10. Осциллограммы симметричных пилообразных импульсов, их спектра и сигнала с выхода синхронизации

сигналы — треугольные. Их осциллограмма и спектр представлены на рис. 10. Их спектр имеет только нечетные гармоники, амплитуда которых быстро падает с ростом их номера. Практически различимы первые пять нечетных гармоник. Форма импульсов на частоте 1 МГц (это максимальная частота) безупречна.

Возможна установка коэффициента симметрии от 0 до 100%, а также фиксированных значений 0 и 50% (симметричный сигнал с равными нарастанием и спадом). Осциллограмма несимметричных пилообразных импульсов с коэффициентом асимметрии 100% и их спектр показаны на рис. 11. В данном случае формируется линейно-нарастающее пилообразное напряжение. Оно имеет довольно широкий спектр, содержащий как нечеткие, так и четкие гармоники. При коэффициенте асимметрии 0% формируется линейно-падающее напряжение.

Генерация дополнительных встроенных сигналов

Нажав в меню кнопку «еще», можно вызвать меню дополнительных сигналов (2 комплекта сигналов). На рис. 12 показан экран генератора с первым набором дополнительных сигналов и выбором сигнала в виде функции Гаусса. Во втором наборе представлены функция Лоренца, нарастающая и убывающая экспоненты и гаверсинус.

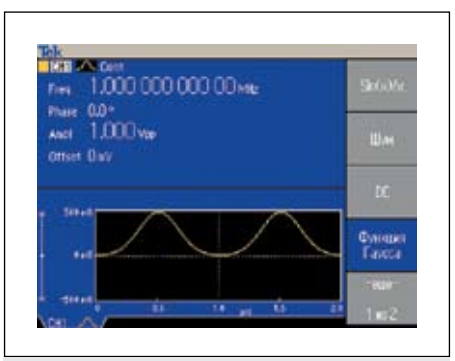

Рис. 12. Экран генератора с первым набором дополнительных функций

На рис. 13 показана осциллограмма функции Гаусса и ее спектр. Последний интересен плавным спадом амплитуд гармоник. В отличие от прямоугольных импульсов (рис. 8) повторяющихся серий высших гармоник тут нет. Похожий спектр имеет функция Лоренца, а спектр гаверсинуса практически аналогичен спектру синусоидального сигнала.

Очень интересен сигнал на основе функции $\sin(x)/x$ (рис. 14). Этот сигнал, будучи периодическим, имеет ряд гармоник с одинаковой амплитудой. На практике создать такой сигнал довольно сложно, поскольку он имеет колебательно изменяющийся как спад, так и нарастание. И в том и другом случае амплитуда колебаний медленно спадает.

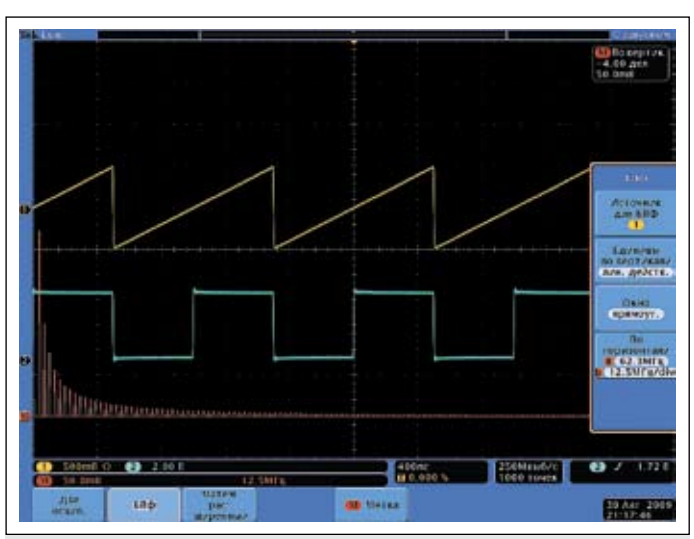

Рис. 11. Осциллограммы несимметричных пилообразных импульсов, их спектра и сигнала с выхода синхронизации

Рис. 13. Осциллограммы сигнала в виде функции Гаусса, его спектра и сигнала с выхода синхронизации

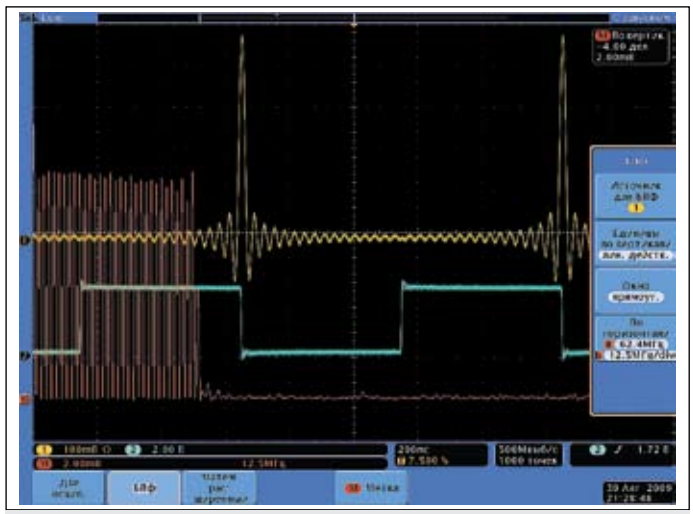

Рис. 14. Осциллограммы сигнала в виде функции sin(x)/x, его спектра и сигнала с выхода синхронизации

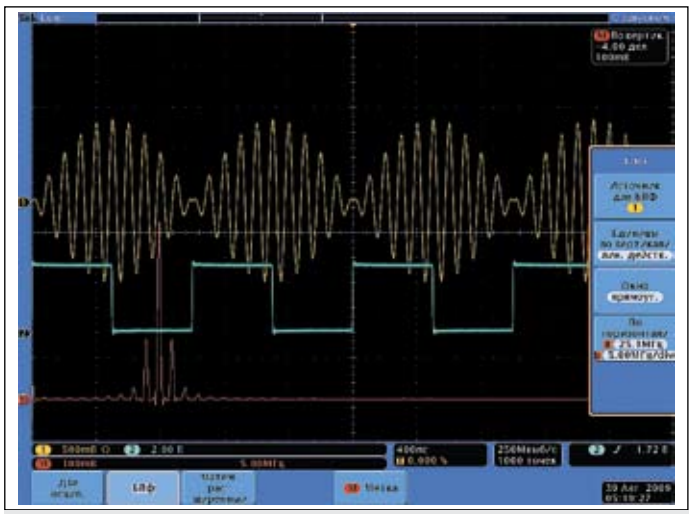

Рис. 15. Осциллограммы амплитудно-модулированного сигнала, его спектра и сигнала на выходе синхронизации

Получение модулированных сигналов

В режиме модуляции возможны четыре вида модуляции: амплитудная AM, частотная FM, фазовая FM и частотная манипуляция FSK. Они возможны для всех видов сигналов, за исключением шума и постоянного тока. На рис. 15 представлена осциллограмма амплитудно-модулированного синусоидального сигнала с 90%-ной модуляцией и ее спектр. При амплитудной модуляции она возможна с коэффициентом модуляции от 0 до 120%.

На рис. 15 отчетливо видно изменение амплитуды по синусоидальному закону. Сигнал на TTL-выходе на рис. 16 в этом случае имеет форму прямоугольных импульсов с частотой, равной частоте модуляции. Его нужно использовать для внешней синхронизации осциллографа, поскольку синхронизация осциллографа от ВЧ модулированного сигнала неустойчива.

Модуляция может осуществляться разными видами сигналов: синусоидальным, прямоугольным, импульсным, шумом и произвольным. Частота внутренней модуляции может быть от 2 мГц до 50 кГц. При частотной модуляции пиковое отклонение частоты составляет половину максимально возможной частоты синусоидального сигнала. Возможна и широтно-импульсная модуляция.

Генерация сигналов произвольной формы

Генерация сигналов произвольной формы — визитная карточка генераторов серии AFG3000. Практически она снимает все ограничения на пути создания сигнала с любой нужной пользователю формой. Произвольный сигнал задается как последовательность отсчетов, заданных с частотой дискретизации генератора: у генераторов AFG3251 и AFG3152 она достигает 2 ГГц. Число точек произвольного сигнала указано в таблице 1.

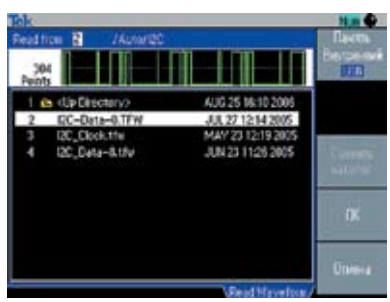

Рис. 16. Пример считывания сигнала произвольной формы из USB-памяти

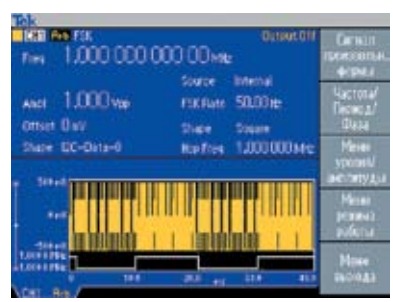

Рис. 17. Окно дисплея генератора для выбранного сигнала произвольной формы

Сигналы произвольной формы можно хранить в четырех разделах встроенной памяти (User 1–4), в разделе редактирования (Edit Memory) или в виде файлов на внешней флэш-памяти USB. На рис. 16 показан пример считывания из USB-памяти сигнала данных от последовательной шины I^2C. На экране виден список файлов в выбранной папке, а в верхней части окна дисплея — вид сигнала.

Нажав кнопку OK у позиции экранного меню, можно загрузить сигнал в редактируемую память и получить окно дисплея с видом данного сигнала и допустимыми установками его параметров. Оно показано на рис. 17.

На рис. 18 показана осциллограмма данного сигнала и его спектр, полученные цифровым осциллографом DPO 4101. Нетрудно заметить, что сигнал имеет очень сложный спектр, который мало помогает в оценке особенностей сигнала. Это говорит о целесообразности применения новых методов спектрального анализа, например короткого оконного преобразования Фурье или вейвлет-анализа.

Объем данной статьи не позволяет детально описать средства задания произвольных сигналов: это тема отдельной статьи. Отметим лишь, что генератор позволяет задавать и редактировать такие сигналы по точкам, вводить исходные и редактируемые затем сигналы, использовать средства интерполяции и экстраполяции, а также применять более удобные программные средства редактирования произвольных сигналов, например программу ArbExpress или систему компьютерной математики MATLAB.

Особенности применения двухканальных генераторов

Для полноценной оценки формы импульсных сигналов двухканальных генераторов AFG3000 были использованы широкополосные осциллографы фирмы Tektronix серии TDS7000. Особенностью двухканальных моделей генераторов, например, AFG3252, является независимая генерация двух любых сигналов — по одному в каждом канале. На рис. 19 показаны осциллограммы двух синусоидальных сигналов с разной частотой.

Наличие двух каналов позволяет строить фигуры Лиссажу (рис. 20). Они строятся

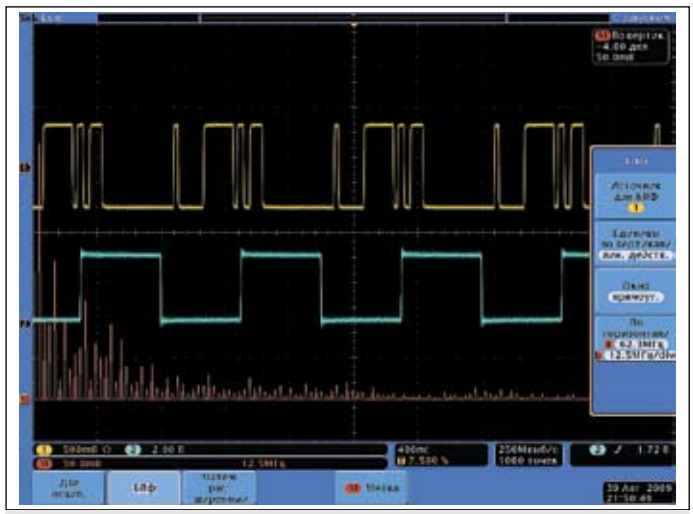

Рис. 18. Осциллограмма и спектр сигнала данных I²C последовательного интерфейса, заданного в виде произвольного сигнала

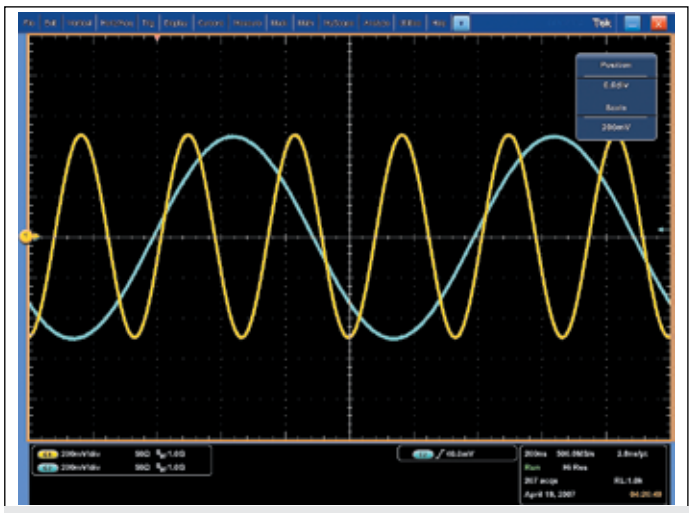

Рис. 19. Осциллограммы синусоидальных сигналов с разной частотой

при подаче одного сигнала на вход Y осциллографа, а другого — на вход X (осциллограф при этом переводится в режим работы XY). С помощью фигур Лиссажу можно с высокой точностью сравнивать частоты двух сигналов с малым отличием частот или с кратными частотами.

Генерация пачек сигналов

Генераторы AFG3000 позволяют получать пачки любых сигналов (режим «Пачка» или «Вспышка»). На рис. 21 показано окно дисплея в этом режиме для случая генерации пачки из $N = 3$ периодов синусоидального сигнала.

Двухканальные генераторы позволяют получать пару пачек с независимой установкой формы сигналов и их параметров. На рис. 22 показано получение на выходах генератора AFG3252 пачек импульсов разной формы и длительности. Это полезно при испытании двухканальных устройств. Следует также отметить, что у генераторов AFG3252 предусмотрены возможности синхронизации нескольких устройств и их запуска для получения многоканальных импульсных последовательностей.

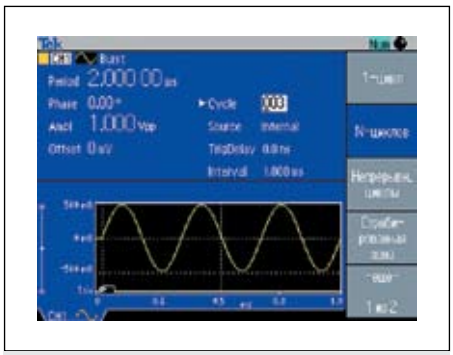

Рис. 21. Окно дисплея генератора AFG3101 в режиме генерации пачки из N = 3 периодов (циклов) синусоидального сигнала

Установив одинаковую частоту обоих сигналов, можно получить дифференциальные сигналы. В этом случае второй сигнал является инверсным по отношению к первому сигналу.

Управление фазой сигнала в пачке

Интересные возможности дает управление фазой сигнала в пачке. Фаза определяет уровень сигнала между импульсами (или одним импульсом при $N = 1$) в пачке. Это, наряду с изменением смещения Offset, открывает возможности получения некоторых новых форм импульсов. На рис. 23 показано создание импульсов из пачки с одним периодом синусоиды. Фаза установлена на значение –120°, смещение на 500 мВ, амплитуда 1 Вп-п, период 400 мкс и интервал 1 мс. Получается образованный из периода синусоиды импульс.

С помощью рис. 24 можно представить, как выглядит такой сигнал на экране осциллографа. Показан также спектр сигнала. Чтобы устранить отрицательный выброс перед импульсом такого сигнала, достаточно установить фазовый сдвиг –90°.

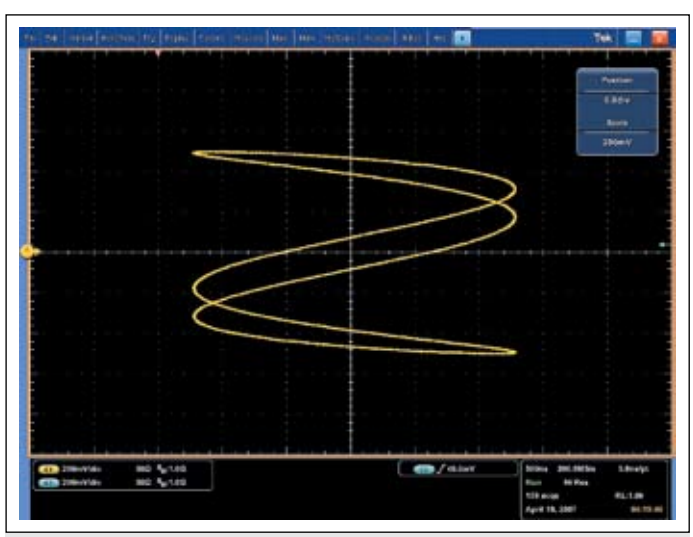

Рис. 20. Фигуры Лиссажу на экране осциллографа TDS7000

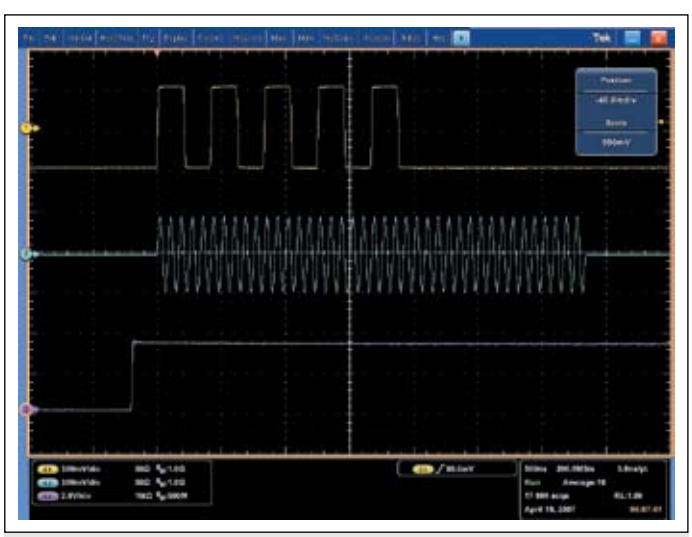

Рис. 22. Пример получения двух пачек импульсов разной формы и длительности

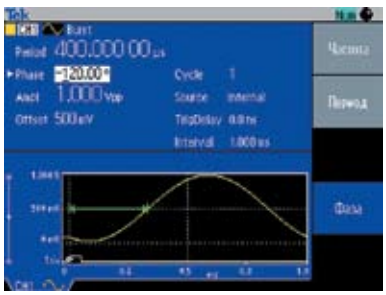

Рис 23. Окно дисплея с установками параметра пачки из одного периода синусоиды с фазовым сдвигом −120°

Сохранение сигналов и настроек генератора

Для хранения созданных пользователем сигналов есть два вида памяти — встроенная и внешняя. Встроенная память позволяет хранить 5 файлов. Число файлов, хранимых в карте флэш-памяти, ограничено лишь ее объемом.

Измерение емкости с помощью генератора AFG3000

Генератор AFG3000 можно использовать как измеритель малых емкостей на основе метода измерения тока заряда или разряда конденсатора при подключении его к источнику импульсов прямоугольной формы (рис. 25). Генератор серии AFG3000 используется как генератор симметричных прямоугольных импульсов (меандра) с заданной частотой *f*. Измеряемая емкость заряжается через диод Д1 и миллиамперметр, а разряжается через диод Д2.

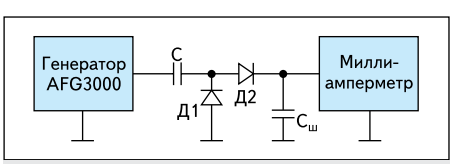

Рис. 25. Схема для измерения емкости методом заряда–разряда

Средний ток заряда (и разряда) емкости в данном случае равен:

$$I = C\Delta Uf,$$

где ΔU — перепад входного напряжения при заряде и разряде *C*. При $C = 1000$ пФ, $\Delta U = 10$ В и $f = 100$ кГц получим $I = 1$ мА. Таким образом, применяя цифровой или аналоговый миллиамперметр, получим при разрешении по току 1 мкА при разрешении по емкости в 1 пФ. В эксперименте использовался мультиметр YF-3700. Минимальный предел измерения тока у него равен 4 мА. В этом случае при $\Delta U = 10$ В можно реализовать следующие пределы измерения емкости (табл. 2).

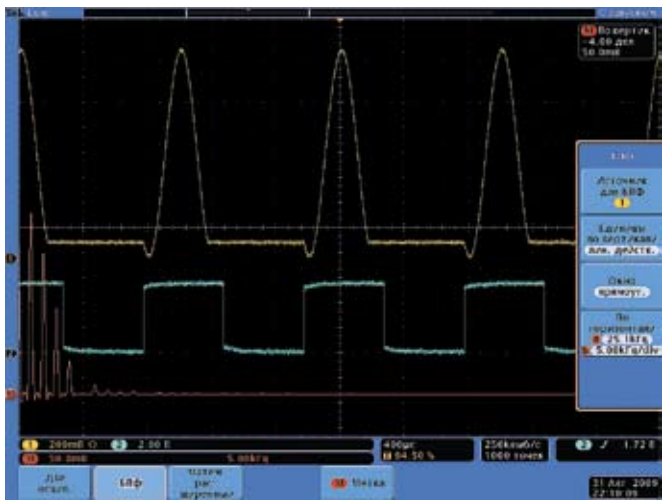

Рис. 24. Осциллограмма импульса, показанного на рис. 23, и его спектр

Таблица 2. Пределы измерения емкости

Частота AFG3101	Предел C, пФ	Разрешение C, пФ
10 МГц	40	0,01
1 МГц	400	0,1
100 кГц	4000	1
10 кГц	40 000	10
1 кГц	400 000	100

Поскольку частота *f* задается в генераторах с высочайшей точностью (нестабильность менее 10^{-6} в течение года работы), то основными причинами погрешности при измерениях является неточность установки перепада напряжения ΔU и погрешность самого измерителя тока (менее 0,5% у цифрового мультиметра). Погрешность установки уровней меандра у генераторов AFG3101 составляет ±1%, то есть тоже достаточно мала. Это позволяет считать основной погрешность от неидеальности диодов. Без калибровки измерительной схемы погрешность может достигать 2–3% при использовании маломощных германиевых диодов с малым остаточным напряжением (до 0,2–0,3 В).

Применение AFG3000 в роли Q-метра

Высокая стабильность амплитуды синусоидального сигнала и широкий диапазон его перестройки по частоте позволяют использовать генератор AFG3000 и в роли некогда популярного прибора — Q-метра (измерителя добротности). На рис. 26 приведена измерительная схема для исследования и настройки резонансных LCR-контуров. Основой схемы является резонансный последовательный контур, подключенный к генератору синусоидальных колебаний AFG3000 через согласующий делитель напряжения с входным сопротивлением 50 Ом и выходным 0,5 Ом. Коэффициент передачи делителя равен 1:100, так что при подаче $U_г = 10$ Вп-п (межпикового напряжения) на контур подается напряжение $U_{вх} = 0{,}1$ Вп-п. Малое выходное сопротивление делителя, которое намного меньше последовательного сопротивления *r* большинства контуров, позволяет оценивать реальную добротность *Q* радиочастотных и (тем более) низкочастотных контуров.

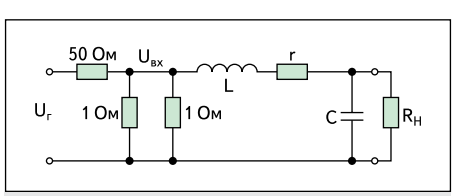

Рис. 26. Измерительная схема для измерения параметров LCR-контуров

Как известно, без учета $R_н$ полное сопротивление последовательного контура:

$$Z(f) = r + j[2\pi fL - 1/(2\pi fC)] \qquad (6)$$

имеет комплексный характер. На резонансной частоте мнимая часть *Z* равна 0, что определяет резонансную частоту контура:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \qquad (7)$$

Другим важным параметром является добротность контура — отношение индуктивного или емкостного сопротивления на резонансной частоте к сопротивлению потерь *r*. Известен ряд формул для добротности, например:

$$Q = \frac{\sqrt{\frac{L}{C}}}{r} = \left(\frac{U_{вых}}{U_{вх}}\right)_{f=f_0} = \frac{f_0}{2\Delta f}, \qquad (8)$$

где $2\Delta f$ — полоса пропускания, измеренная на уровне спада резонансной кривой до уровня 0,707 от максимума.

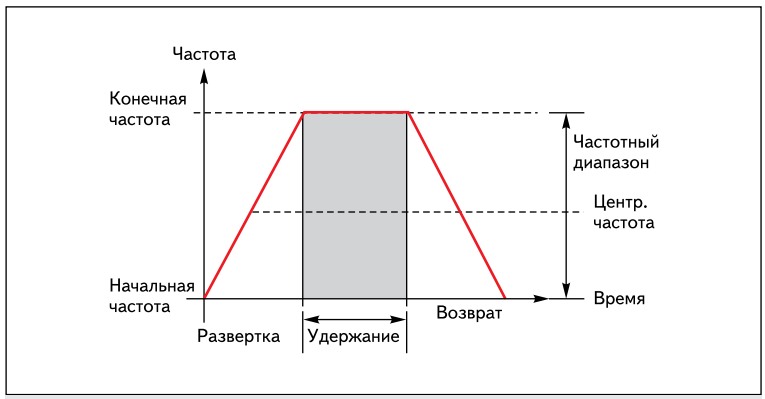

Рис. 27. Зависимость частоты от времени в режиме качания (свип-генератора)

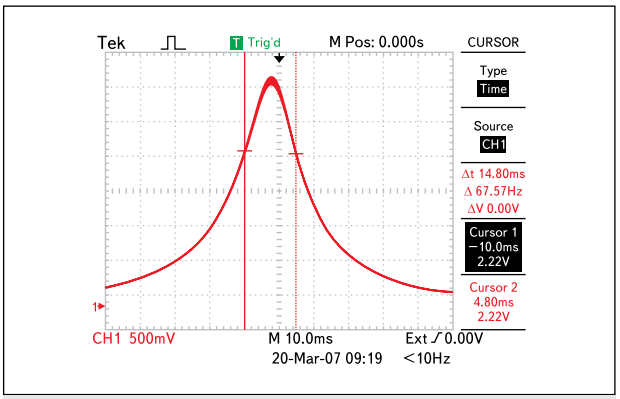

Рис. 28. АЧХ контура и пример использования курсорных измерений

Схему, представленную на рис. 25, с подходящим ВЧ-вольтметром или осциллографом можно использовать для ручного снятия АЧХ. Найдя максимум выходного напряжения при резонансе контура, нетрудно с помощью (8) найти добротность контура как отношение выходного напряжения к входному.

Применение AFG3000 в ГКЧ

Для автоматического снятия АЧХ различных устройств и их испытания при изменении частоты сигналов служит режим «Качание» (кнопка Sweep). Зависимость частоты от времени представлена на рис. 27. Все указанные на этом рисунке временные и частотные параметры можно задавать в экранном меню.

Теперь АЧХ контура можно получить, подключив осциллограф выходу цепи (рис. 26) через высокочастотный диод. Настройте осциллограф или генератор на равенство «длительность развертки осциллографа = длительность развертки генератора». Тогда на экране будет получена АЧХ контура. Такая АЧХ представлена на рис. 28. Она получена с применением осциллографа Tektronix TDS2024B.

Тестирование интегральных компараторов и операционных усилителей

Есть множество типовых применений генераторов AFG3000 в роли генераторов синусоидальных или импульсных сигналов.

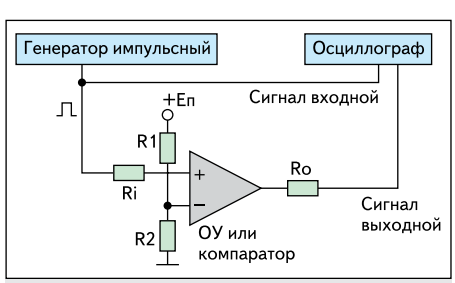

Рис. 29. Схема испытания компаратора или операционного усилителя

Например, это тестирование интегральных операционных усилителей и компараторов (рис. 29), логических и цифровых микросхем и других устройств. По искажению формы выходного импульса тестируемого устройства можно судить о качестве прибора.

Тестирование радиопередающих и радиоприемных устройств

Высокая стабильность частоты генераторов позволяет использовать их для проверки аналоговых и цифровых частотомеров или в роли задающих генераторов радиопередающих устройств и гетеродинов радиоприемных устройств в ходе их тестирования и исследования. Уровень и частоты генераторов AFG3000 вполне достаточны для проверки радиотрактов таких устройств вплоть до СВЧ-диапазона.

В то же время надо заметить, что генераторы не предназначены для проверки высокочувствительных радиоприемных устройств. Минимальный уровень напряжения у генераторов составляет от 10 до 50 мВ (табл. 1), тогда как для проверки радиоприемных устройств нужны достаточно точные сигналы с уровнем в доли – единицы мкВ. Уровень экранировки у генераторов AFG3000 не оговорен, поэтому к генераторам стандартных сигналов для проверки радиоприемных устройств их относить нельзя.

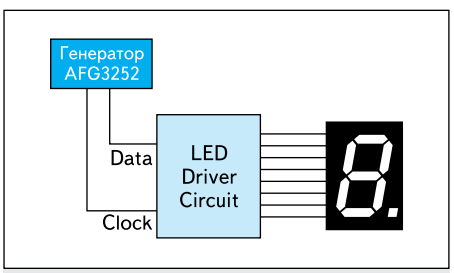

Рис. 30. Пример тестирования индикаторной панели

Тестирование индикаторной панели

На рис. 30 показано применение двухканального генератора AFG3252 для тестирования индикаторной панели с последовательной шиной данных. Канал CH1 создает тактовые импульсы — меандр «Время», а канал CH2 — импульсы данных. Зажигание того или иного элемента индикаторной панели происходит, если появляется импульс в определенное время. Практически последовательность данных должна задаваться в виде импульсов произвольной формы, отвечающих протоколу работы индикаторной панели.

Создание сигналов с кодоимпульсной модуляцией

Благодаря точной установке фазового сдвига между двумя синусоидальными сигналами двухканальные генераторы AFG3000 позволяют формировать I/Q сигналы, пред-

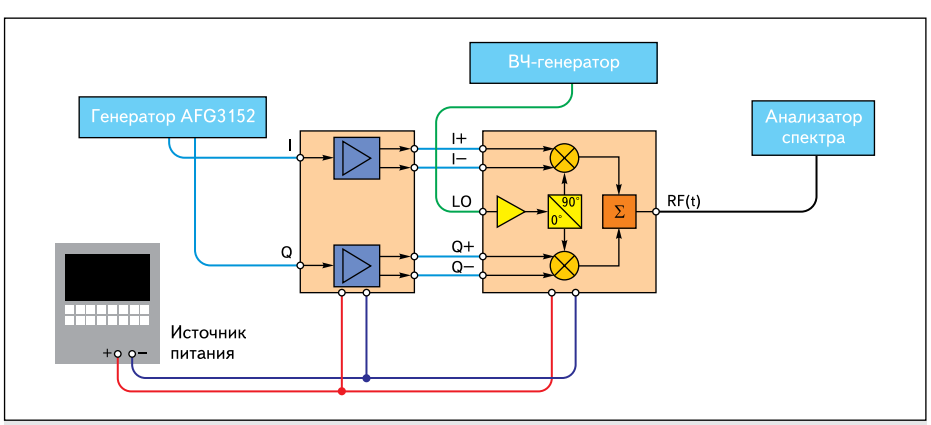

Рис. 31. Функциональная схема создания кодоимпульсного сигнала

ставляющие их на комплексной плоскости, с точным фазовым сдвигом в 90°. На рис. 31 показана функциональная схема создания кодоимпульсного сигнала на основе I/Q модулятора [4]. Она позволяет исследовать такие сигналы, например, с помощью анализатора спектра с частотой модуляции до 50 МГц.

Другие применения

Генераторы AFG3000 можно использовать в качестве генераторов опорного высокостабильного сигнала с частотой 10 МГц (выход есть на задней панели). Можно, напротив, обеспечить работу генератора от внешнего сигнала с частотой 10 МГц (область захвата при этом равна ±35 кГц). Несколько генераторов могут работать синхронно. Как уже было отмечено, есть возможность суммирования выходных сигналов с внешним сигналом. Для защиты основного выхода от коротких замыканий и перегрузок по напряжению имеется встроенная защита и внутренний плавкий предохранитель. Выпускается переходник и с внешним предохранителем. ■

Литература

1. Дьяконов В. П. Генерация и генераторы сигналов. М.: СОЛОН-Пресс, 2009.
2. Дьяконов В. П. Многофункциональные генераторы Tektronix AFG3000 // Контрольно-измерительные приборы и системы. 2006. № 6 (часть 1). 2007. № 1 (часть 2).
3. ZXYs of Signal Generators. Tektronix Innovation. 2007. www.tektronix.com
4. Characterization of IQ Modulators Counts On Flexible Signal Generator Stimulus. 2007. www.tektronix.com