

## Средства измерений для разработчиков аппаратуры

А.А. Дедюхин, ЗАО «ПриСТ»,  
к.т.н. А.В. Пивак, ЗАО «ПриСТ»,

*В статье рассмотрены критерии выбора измерительной техники для разработчиков аппаратуры, приведен обзор наиболее востребованных средств измерений электрических и радиотехнических величин, даны примеры возможностей конкретных приборов.*

В процессе разработки, испытаний и настройки новой аппаратуры различного назначения возникает необходимость использования средств измерений. С их помощью оценивается правильность работы вновь проектируемого устройства: проводятся замеры в контрольных точках, проверяется реакция на тестовые сигналы и т.д. Однако требования к средствам измерений, используемым в процессе разработки новых устройств, отличаются от тех, которые предъявляются для лабораторных измерений. Метрология лабораторных средств измерений является консервативной дисциплиной, строго ограниченной рамками действующей нормативной документации, допусками и погрешностями. Такой консерватизм при разработке новых устройств не обязателен. Разработчикам в первую очередь удобнее применять универсальные приборы с гибкими возможностями и уже потом обращать внимание на точностные характеристики. Поэтому меняются и критерии выбора необходимых средств измерений.

Далее в статье приведен обзор наиболее общих средств измерения, применяемых при разработке различной радиоэлектронной аппаратуры. В минимальный набор таких средств измерения электрических и радиотехнических величин, как правило, входят: источник питания постоянного тока, универсальный вольтметр, генератор тестовых сигналов, осциллограф, измеритель RLC, частотомер.

## Источники питания постоянного тока

Данные устройства не следует путать с различного рода блоками питания, преобразующими напряжение сети в фиксированное выходное напряжение (например, 9 В) и не имеющими никакой стабилизации. Источники питания постоянного тока — это устройства позволяющие получить высокостабильное постоянное напряжение или постоянный ток. В таких устройствах нестабильность находится на уровне 3 мВ при изменении тока в нагрузке от нуля до максимального значения — это так называемый режим стабилизации по напряжению. Аналогично, при работе в режиме стабилизации по току источник питания поддерживает заданное значение тока в нагрузке при изменении напряжения на нагрузке. Очевидно, что при разработке новой аппаратуры собственный вторичный источник питания на некоторых стадиях не применяется, поскольку не всегда известна потребляемая устройством мощность, число внутренних контактов, их полярность или заведомо известно, что устройство будет питаться от батарей, аккумулятора или бортовой сети автомобиля, самолета и т.д. В этом случае для питания аппаратуры и применяются источники питания постоянного тока, тем более, что они имеют третий обязательный, но немаловажный режим отсечки тока. Назначение этого режима в том, что инженер на источнике питания задает ток, потребление которого по его заключению, устройство не должно превысить. И в случае, если потребляемый ток превышает установленный предел, источник питания снимает напряжение с устройства, тем самым предотвращая его от выхода из строя. Источники питания можно классифицировать по нескольким параметрам.

**По принципу действия — линейные или импульсные.** Линейные источники питания построены по классической схеме, использующей мощный сетевой трансформатор и схему регулирования. Такие

источники питания обладают низким уровнем излучаемых помех, что особенно важно при конструировании радиоприемной аппаратуры, но имеют большой вес (за счет трансформатора) и малую удельную мощность (т.е. отношение мощность / масса). К линейным источникам питания относятся устройства серий GPS, GPC, GPR производства компании GOOD WILL Instek. Импульсные источники питания построены по принципу преобразования сетевого напряжения в переменный ток достаточно высокой частоты, порядка 200 кГц, и дальнейшего трансформирования и регулирования. Поскольку трансформаторы таких источников питания работают на частотах значительно выше 50 Гц, то и собственный размер, и масса источника питания становятся гораздо меньше. Удельная мощность таких источников питания значительно выше, чем у линейных источников. Поэтому в эру миниатюризации именно импульсные источники питания и получили такое широкое распространение. Но они обладают одним недостатком — большой по сравнению с линейным источником уровень излучаемых помех. К импульсным источникам питания относятся источники серий SPS, PSH, PSP производства компании GOOD WILL Instek.



Рис. 1. Четырехканальный источник питания GPS-4303

WILL Instek (см. рис. 2).

**По мощности.** Источники малой мощности — до 100 Вт на канал, например, источники питания серии GPS-4303, GPS-3303, GPS-4251 (см. рис. 1). Средней мощности — до 300 Вт, например, серии SPS-3610, SPS-1820, GPR-3060D, GPR-11P30D

Большой мощности — свыше 300 Вт, например, линейные источники типа GPR-1830HD, GPR-100H05D и др., или импульсные источники питания типа PSH-3630, PSH-6018 (мощность до 1000 Вт) и другие производства компании GOOD



Рис. 2. Импульсный источник питания большой мощности PSH-3630

**По количеству каналов.** Современные источники питания имеют уже не один регулируемый выход, а два, три и даже четыре, например, как GPS-4303, PST-3201 и другие источники этих серий. Чаще всего два выхода являются основными, их можно органами передней панели соединять последовательно для увеличения выходного напряжения или параллельно для увеличения максимального тока. Выходы можно коммутировать также для получения комбинированных напряжений различной полярности. Другие источники питания имеют фиксированные значения напряжения на дополнительных выходах, например, 3,3, 5 или 12 В, что обусловлено различными стандартными напряжениями питания элементной базы.

**По минимальной дискретности установки выходных параметров.** Большинство современных источников питания имеют нестабильность выходного напряжения и тока в пределах 3 мВ и 3 мА. Дискретность установки выходного напряжения и тока составляет 10 мВ и 10 мА соответственно. Но для особо прецизионных исследований или при использовании источника питания в качестве источника прецизионных напряжений и токов разработаны устройства с дискретностью установки выходного напряжения и тока соответственно 1 мВ и 1 мА. У таких источников питания нестабильность напряжения и тока уже составляет 350 мкВ и 250 мкА. К ним относятся источники типа PSM-2010, PSM-3004 и PSM-6003 производства компании GOOD WILL Instek.



Рис. 3. Программируемый источник питания PPE-3323

**По наличию дополнительных возможностей.** Современные источники питания в своем составе имеют встроенный управляющий микроконтроллер, значительно расширяющий возможности разработчиков. Например, возможно дистанционное управление всеми режимами работы прибора через интерфейсы RS-232 или GPIB. Некоторые источники питания имеют до 100 ячеек памяти с записанными режимами работы и выходными параметрами, например, PPS-3635, PPE-3323, что значительно облегчает установку фиксированных разработчиком параметров (см. рис. 3). Чаще всего источники питания, имеющие функцию памяти, имеют еще и возможность записи времени. Эта функция используется для имитации медленной флуктуации источника питания и изучения поведения разрабатываемого или испытываемого устройства. Другие источники питания могут по заданной программе мгновенно изменить

напряжение питания (или ток) для исследования реакции на значительное изменение параметров питания устройства.

## Универсальные вольтметры

Современные универсальные вольтметры предназначены для измерения постоянного и переменного напряжения и тока, сопротивлений, емкостей. Обычно их рабочий диапазон частот простирается до 100 кГц. От мультиметров их отличает лабораторное исполнение (в том числе отсутствие автономного питания), большее количество разрядов и меньшая погрешность измерения. При измерениях кратковременных процессов, например, тока срабатывания УЗО, удобной являются функции пиковых измерений и удержания показаний. Для большинства измерений на производстве хватает базовой погрешности вольтметра на уровне  $\pm 0,01 \dots 0,05\%$ , что достижимо в простых универсальных вольтметрах, например, GDM-8245. Более сложные модели, например, В7-78 (см. рис. 4) уже обладают базовой погрешностью измерения  $0,002\%$  и имеют дополнительные режимы измерения частоты, периода, температуры, вычисления среднего значения из измеренного массива данных, измерения в режиме допускового контроля и многое другое. Если же у разработчика нет нужды в сложных лабораторных вольтметрах, то для решения большинства прикладных задач вполне будет достаточно и мультиметра. Так, современные мультиметры APPA-305 имеют базовую погрешность  $0,06\%$  и все режимы работы, доступные для хорошего стационарного вольтметра.



Рис. 4. Универсальный вольтметр В7-78

## Генераторы тестовых сигналов



Рис. 5. Генератор сигналов произвольной формы ГСС-10 из серии ГСС-05 ... 120

Диапазоны частот, уровни и формы тестовых сигналов очень разнообразны. Тенденция развития генераторов сигналов такова, что в последнее время большое внимание уделяется разработке генераторов сигналов специальных форм. Прежде всего, это связано с бурным развитием элементной базы, позволившей сегодня по умеренной цене дать генераторы сигналов с возможностями, недоступными 10 лет назад. Такие генераторы формируют сигналы синусоидальной, прямоугольной и треугольной формы (например, SFG-2010 компании GOOD WILL), имеют режим свипирования частоты (для измерения АЧХ устройств), имеют режимы амплитудной и частотной модуляции (например, SFG-2110 компании GOOD WILL). Другие генераторы имеют возможность дополнительно формировать сигналы пилообразной, шумовой формы, формирования пакетов, режим фазовой модуляции (например, ГСС-93/1, ГСС-05, ГСС-120). Современные генераторы сигналов строятся по принципу прямого синтеза на основе ЦАП с частотами дискретизации до 300 МГц, что существенно расширяет возможности инженера. Помимо стандартных форм сигнала, упомянутых выше, предоставляется возможность формировать до 30 различных, наиболее часто используемых на практике форм сигнала в стандартном режиме. Используя возможности формирования сигнала произвольной формы, пользователь может сформировать собственный сигнал. Генераторы работают в диапазоне частот от единиц мГц до 120 МГц и способны синтезировать сигнал с амплитудой до 10 В на нагрузке от 50 Ом до 1 МОм. Одним из недорогих вариантов такого генератора являются приборы из серии ГСС-05 ... 120 (см. рис. 5) с технологией прямого цифрового синтеза. Генераторы этой серии оснащены встроенным частотомером, что расширяет область их использования и соответствует концепции универсальных приборов.

## Осциллографы

Это основное средство визуального контроля различных процессов. Осциллографы предназначены для измерения амплитудных и временных параметров сигнала, являются самыми универсальными и наиболее часто используемыми приборами. При выборе осциллографа надо представлять задачи, для которых он будет использоваться. При разработке несложных аналоговых систем возможно применение аналоговых осциллографов. Работа с однократными и цифровыми сигналами потребует цифровых запоминающих осциллографов, характеристики которых более многообразны, чем у аналоговых. К этим характеристикам относятся часто та дискретизации, объем памяти, быстродействие и т.д. Нахождение их оптимальной комбинации зависит от конкретных условий. Одним из компромиссных вариантов являются аналогово-цифровые осциллографы, у которых цифровой режим является вспомогательным. Такой прибор представляет собой полноценный аналоговый осциллограф, на котором можно наблюдать однократные сигналы, а также медленно изменяющиеся сигналы в режиме самописца. Осциллограф GRS-6052A (см. рис. 6) производства компании GOOD WILL обладает полосой пропускания 50 МГц и частотой дискретизации в цифровом режиме 100 МГц. Прибор имеет режимы курсорных и автоматических измерений. К нему можно подключать различные пробники:



Рис. 6. Аналогово-цифровой осциллограф GRS-6052A

Такой прибор представляет собой полноценный аналоговый осциллограф, на котором можно наблюдать однократные сигналы, а также медленно изменяющиеся сигналы в режиме самописца. Осциллограф GRS-6052A (см. рис. 6) производства компании GOOD WILL обладает полосой пропускания 50 МГц и частотой дискретизации в цифровом режиме 100 МГц. Прибор имеет режимы курсорных и автоматических измерений. К нему можно подключать различные пробники:



высоковольтные (до 20 кВ), токовые (до 100 А) или дифференциальные (гальванически развязанные относительно корпуса прибора).



Рис. 7. Цифровой осциллограф LeCroy серии WaveRunner

Цифровые осциллографы LeCroy серий WaveSurfer и WaveRunner (см. рис. 7) обладают значительно большими возможностями по сравнению с аналоговыми и цифро-аналоговыми. В первую очередь, это относится к числу каналов, частоте дискретизации и размеру внутренней памяти. У осциллографов серии WaveSurfer число каналов равно двум или четырем, чего вполне достаточно для исследования нескольких связанных между собой по времени событий, частота дискретизации составляет 1 ГГц на канал, а размер памяти 1 Мбайт на канал. У осциллографов серии WaveRunner четыре канала, а в 500-МГц моделях — два, частота дискретизации составляет до 10 ГГц на канал, а размер памяти до 24 Мбайт на канал. Осциллографы имеют режимы синхронизации, позволяющие фиксировать любые аналоговые и цифровые сигналы, включая синхронизацию по длительности сигнала, по интервалу между сигналами, по гличу, по скорости нарастания фронта, по логическим состояниям, рантовую синхронизацию и т.д. Применение сегментированной развертки позволяет записать все, даже редко повторяющиеся сигналы без потери информации, как о самом сигнале, так и о его привязке ко времени.

Цифровые осциллографы LeCroy серии WaveSurfer и WaveRunner позволяют одновременно измерять до 8 параметров различных сигналов, а общий перечень измеряемых параметров превышает 40. Некоторым разработчикам будут небесполезны математические функции, используемые в осциллографах LeCroy. В дополнение к ставшим уже обыденными функциям, таким как сложение, вычитание, умножение, деление, быстрое преобразование Фурье, осциллографы LeCroy предлагают еще более 50 различных математических функций, включая создание собственных сценариев и алгоритмов на языке VBS. При подключении модуля MS-32, осциллографы WaveSurfer и WaveRunner дополнительно приобретают возможность анализа до 32 логических каналов, что в полной мере соответствует современным требованиям по разработке цифровых устройств, использующих 32-разрядную шину. При разработке устройств, использующих ЦАП или АЦП, кроме цифровых сигналов можно анализировать аналоговые сигналы, формируемые ЦАП или поступающие на АЦП.

Использование специализированных программ для измерения и анализа мощности, тестирование устройств использующих различные протоколы передачи, например, USB 2.0, сохранение отдельных осциллограмм (или групп), вставка осциллограмм в принципиальные схемы или описания, печать, передача информации по каналу Ethernet, создание, хранение и обработка массивов данных — вот далеко не полный перечень функциональных особенностей осциллографов LeCroy.



## Измерители RLC

Основное отличие измерителей друг от друга заключается в диапазоне тестовых частот. Поскольку значение модуля комплексного сопротивления зависит от частоты, то набор частот определяет диапазон измеряемых значений емкости и индуктивности. В современных измерителях тест-сигнал формируется с помощью технологии прямого цифрового синтеза, что дает широкую сетку частот. Значение комплексного сопротивления вычисляется через значения тока и напряжения на измеряемом элементе с помощью цифровой обработки. Диапазон частот до 1 МГц обеспечивает измерение емкости от 2 пФ и индуктивности от 1 мкГн. Для удобства измерений приборы имеют возможность компенсации начальной емкости измерительных проводов в четырехпроводной схеме измерений и измерений с использованием постоянного смещения. Обычно измерители RLC имеют два способа подключения тестируемых компонентов: либо с помощью выносного щупа, либо через тестовую площадку. Прибор WK 4270 (см. рис. 8) производства компании Wayne Kerr дополнительно имеет режимы сортировки компонентов, а также индикации тока и напряжения.



Рис. 8. Измеритель RLC WK 4270

## Частотомеры



Рис. 9. Частотомер ЧЗ-85

К настоящему времени существует множество приборов, в которых заложена возможность измерения частоты: мультиметры, генераторы со встроенными частотомерами, осциллографы. Однако, наиболее полно функции частотновременных измерений реализованы в специализированных приборах — частотомерах. Массовое распространение получили недорогие универсальные частотомеры прямого счета, которые позволяют измерять не только частоту, но и временные интервалы, и количество импульсов. Универсальные частотомеры имеют один (два — при измерении временных интервалов) низкочастотный вход до 100 ... 200 МГц и один высокочастотный вход, причем современные конструктивные решения позволяют расширить диапазон измеряемых частот по данному входу до 3 ... 6 ГГц. Одной из важных характеристик частотомеров является количество отображаемых разрядов, от которой непосредственно зависит их минимально достижимая погрешность. Большинство частотомеров способны индцировать до 10 разрядов, но есть модели, в которых этот показатель намного больше. Одними из наиболее массовых частотомеров в настоящее время являются частотомеры серии ЧЗ-85 (см. рис. 9). Базовая модель — частотомер ЧЗ-85 позволяет производить измерение частоты от 10 Гц до 3 ГГц, измерение периода от 0,1 с до 4,54 нс, измерение пикового напряжения на входе. Частотомер обладает функцией допускового контроля при измерении частоты и периода, что значительно ускоряет измерение, если инженер при разработке того или иного устройства знает, за пределы какого значения не должно выходить значение частоты. Память на 20 профилей облегчает установку режимов измерения и контроля, особенно если смена режимов измерения производится достаточно часто. В последнее время частотомеры в базовой комплектации могут не иметь высокостабильного термостатированного опорного генератора — для большинства практических приложений в этом нет необходимости, а стоимость частотомера это увеличивает очень заметно. Прибор ЧЗ-85 в базовой комплектации обеспечивает погрешность измерения частоты  $10^{-7}$ , а при установке опционального термостатированного генератора точность

измерения повышается до  $5 \times 10^{-8}$ . Частотомер ЧЗ-85 способен индицировать 12 разрядов при времени счета 10 с, что позволяет отслеживать изменения в доли Гц при частоте сигналов на уровне 1 ГГц. Модификация частотомера ЧЗ-85/1 имеет расширенный до 5 ГГц диапазон верхних частот, а у частотомера ЧЗ-85/2 он достигает 6 ГГц. Этого вполне достаточно для применения в большинстве разработок.

Количество видов электро- и радиосредств измерений, которые могут еще быть добавлены к списку, не уступает перечисленным. Это анализаторы спектра, измерители модуляции и нелинейных искажений, измерители мощности и т.д. Номенклатура однотипных средств измерений по классу точности также очень велика. Однако приведенные примеры базового набора приборов для разработчика пригодны для решения и серьезных метрологических задач.