

Многофункциональные калибраторы — новый класс измерительных приборов

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

Сейчас используется множество измерительных приборов, в том числе многофункциональных, таких как цифровые мультиметры, осциллографы смешанных сигналов и др. Все они, как и компоненты массового применения (резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности), требуют периодической калибровки и тестирования. В статье описан новый класс измерительных приборов — многофункциональные калибраторы, которые осуществляют калибровку и тестирование разнообразных современных приборов, компонентов и технологических средств.

Введение

До сих пор в продаже сохранились «магазины» высокоточных сопротивлений (резисторов) (рис. 1), конденсаторов и катушек индуктивности, предназначенных для проверки приборов, измеряющих всего одну величину — резистивность резисторов, емкость конденсаторов или индуктивность индукторов. Эти электронные компоненты являются самыми массовыми, их выпускают не только в промышленном масштабе, но и создают индивидуально при изготовлении электронных блоков. Это требует их метрологического контроля, то есть калибровки, как в процессе изготовления, так и при применении.

«Магазины» резисторов, конденсаторов и катушек индуктивности обычно используются для прямой генерации нужной величины, без ее преобразования в другую величину при измерениях. Они имеют громоздкий пластиковый (иногда сделанный из дуба) корпус, массивные переключатели с очень малым переходным сопротивлением

контактов и наборы дорогих прецизионных резисторов, конденсаторов и катушек индуктивности.

Стационарные калибраторы напряжения и тока ГС8.033

В отличие от указанных величин, прецизионных источников напряжения и тока в природе нет. Применяемые иногда химические элементы (например, нормальные) имеют неудобные номиналы, а их применение затруднено многочисленными ограничениями. Поэтому для калибровки напряжения и тока приходится разрабатывать высокоточные электронные устройства — калибраторы.

Типичным и вполне современным калибратором напряжения и тока (как постоянного, так и одно-/трехфазного переменного) является калибратор ГС8.033 российской компании «Парма» (Санкт-Петербург) (рис. 2) [3]. Прибор обеспечивает формирование сложного сигнала с частотой напряжения промышленной сети, содержащего постоянную составляющую, сигнал первой

гармоники и от двух до 40 его высших гармоник.

Калибратор обеспечивает:

- измерение постоянного напряжения от 10 до 450 В;
- измерение действующего значения фазового напряжения от 10 до 308 В;
- измерение действующего значения междуфазного напряжения от 17,32 до 532 В;
- относительную погрешность измерения $0,016+0,001 \times (U_n/U_k-1)$;
- основную частоту переменного напряжения и тока от 45 до 55 Гц;
- фазовый сдвиг, регулируемый от 0° до 360° ;
- потребляемую мощность до 250 ВА.

Его габаритные размеры — 450×145×360 мм, а масса — 10 кг.

Прибор построен по принципу «источник/измеритель» и дополнен средствами калибровки резистивных элементов. В нем используется цифровой метод прямого синтеза напряжения и тока источника. В калибраторе применены типовые цифровые и аналоговые блоки (рис. 3). Прибор имеет модульное исполнение.



Рис. 1. Типичный «магазин» сопротивлений: измерительный Р33 советских времен



Рис. 2. Внешний вид настольного калибратора напряжения и тока «Парма ГС8.033»

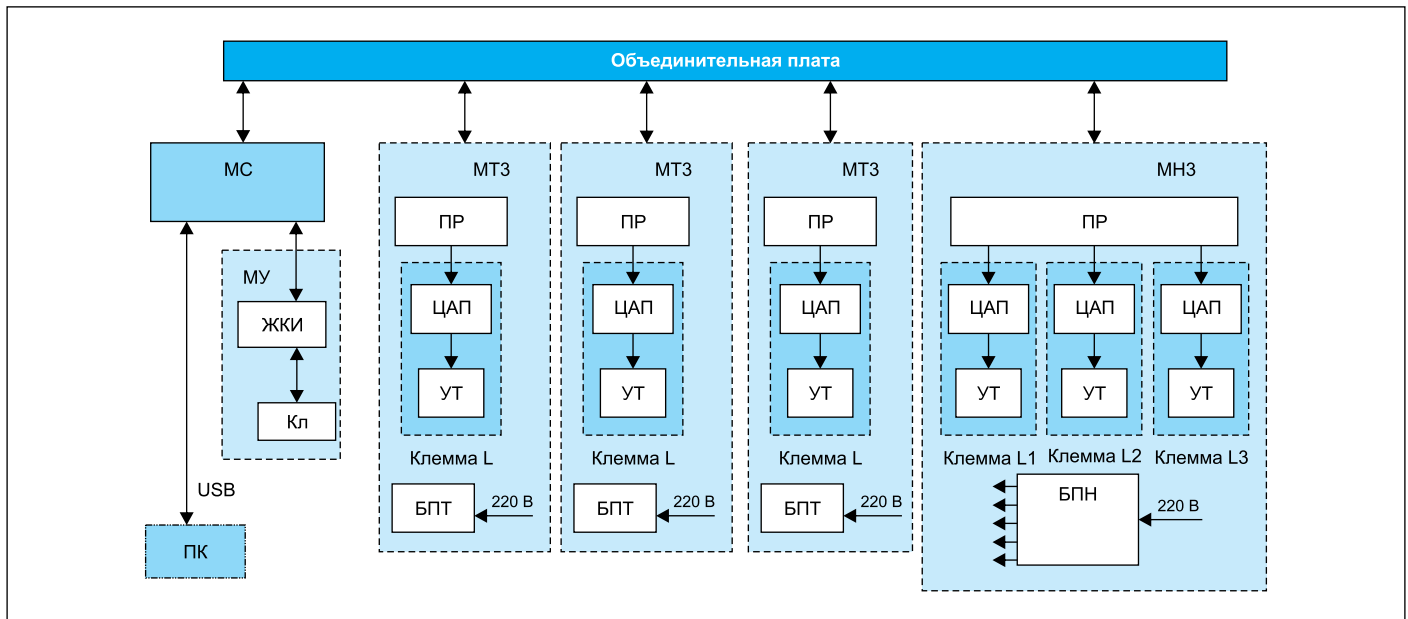


Рис. 3. Функциональная схема калибратора напряжения и тока «Парма ГС.033»

Калибраторы (источники-измерители) фирмы Keithley

В области создания калибраторов постоянного напряжения и тока, особенно для применения в микроэлектронике и нанотехнологиях [2, 3], мировым лидером является фирма Keithley (США). Компания выпускает свыше десятка типов таких калибраторов, в последние годы на нашем рынке их представляет, например, российская компания Elikс. Приборы имеют единообразное исполнение и отличаются диапазонами тока и напряжения, стоимостью и областью применения.

К примеру, источники/измерители Keithley SourceMeter 2430-C (рис. 4) — это одноканальные комбинированные приборы, объединяющие в одном корпусе:

- высокостабильный малошумящий программируемый источник питания с режимом электронной нагрузки;
- прецизионный 5,5-разрядный цифровой мультиметр;
- генератор тока (с TrueRMS);
- генератор мощных токовых импульсов.

Упрощенная функциональная схема приборов показана на рис. 5 и хорошо поясняет основные функции приборов — калибровку напряжений и токов. SourceMeter 2430-C позволяют снимать и регистрировать семейства вольт-амперных характеристик различных нелинейных приборов. Затем полученные данные можно распечатать на принтере.

Особенности приборов:

- 4-квadrантная рабочая область (рис. 6).
- Широкий диапазон генерации и измерений:
 - ток: от 10 пА до 10 А;
 - напряжение: от 1 мкВ до 1100 В;
 - мощность: от 20 до 1000 Вт.



Рис. 4. Калибратор (источник-измеритель) Keithley 2430-C

- Базовая погрешность 0,012% при 5-разрядном разрешении.
- Генерация мощного токового импульса — до 10,5 А/1000 Вт (модель 2430).
- Возможность развертки генерации/измерения (линейные и логарифмические ступенчатые развертки, пользовательская развертка по списку).

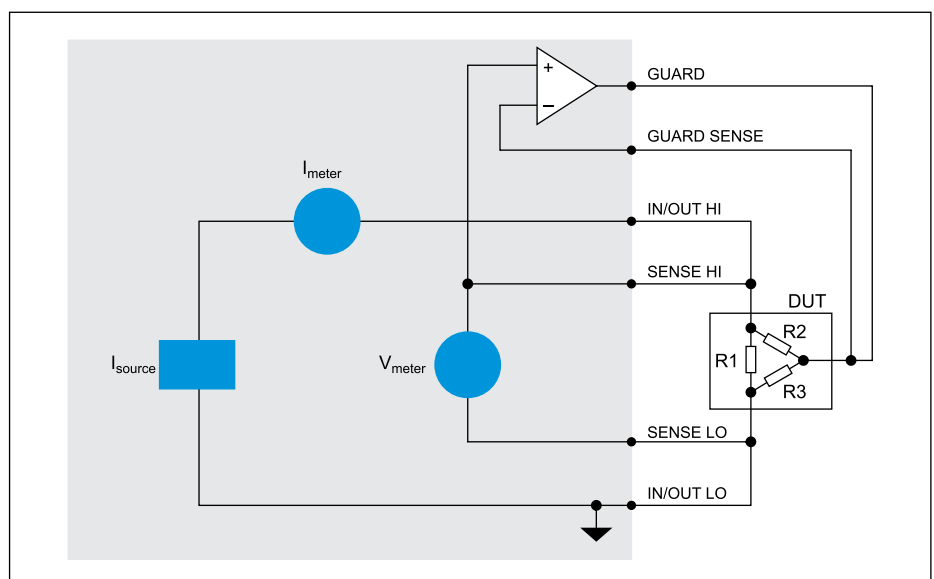


Рис. 5. Упрощенная функциональная схема калибратора Keithley 2430-C

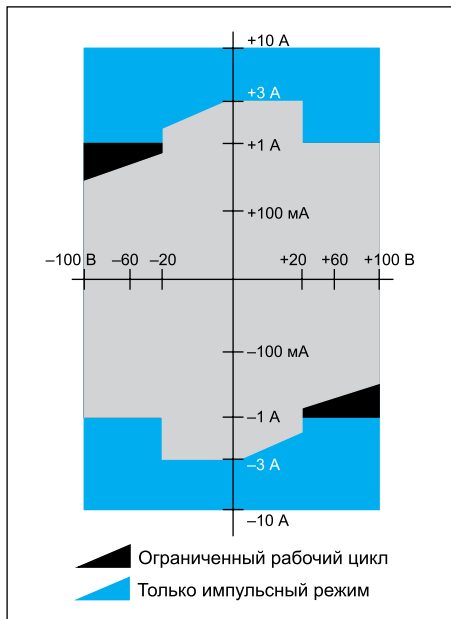


Рис. 6. 4-квadrантная рабочая область калибратора Keithley 2430-C

- Возможность сохранения в памяти пользовательского списка для тестирования (до 100 точек).
- Сохранение показаний и установок. Память на 5000 значений при 5,5 разряда (два буфера по 2500 точек) и шесть настроек (пять пользовательских настроек, заводская настройка по умолчанию).
- 6-проводное измерение сопротивления с помощью программируемого источника тока или источника напряжения с V- или I-зажимом.
- Высокая скорость проведения операций. При 4,5 разряда — до 2030 измерений во внутреннюю память и 1754 измерения в GPIB.
- Встроенный компаратор для быстрого проведения тестирования «годен/не годен» (до 12 стадий предельных испытаний).
- Цифровой порт ввода/вывода для обеспечения операций сортировки по контейнерам или состыковки с манипулятором электронных компонентов.
- Одновременные измерения с использованием дистанционного интерфейса.
- Функция проверки контактов, которая обеспечивает быструю и удобную проверку контактов без подачи на испытуемое изделие тока.
- Математические выражения. Пять встроенных, до пяти определяемых пользователем (только шина).
- Три скорости измерения: высокая, средняя, нормальная.
- Калибровка при закрытом кожухе.
- Свободное программное обеспечение LabTracer 2.0.
- Графический интерфейс, позволяющий подключать и конфигурировать восемь источников/измерителей серий 2600 и 2400.

- Общие характеристики калибраторов:
- Входное сопротивление измерителя напряжения >10 ГОм.
 - Интерфейсы: GPIB (IEEE-488), RS-232, TSP-link, цифровой интерфейс ввода/вывода.
 - Напряжение питания: 100–240 В, 50/60 Гц.
 - Максимальная потребляемая мощность: 250 Вт.
 - Размеры: 89×213×370 мм.
 - Вес: 4,1 кг.

Калибраторы — параметрические анализаторы корпорации Agilent

Один из лидеров мирового рынка измерительных приборов — крупная корпорация Agilent Technologies — не осталась в стороне от разработки и серийного выпуска высокоточных многофункциональных калибраторов — параметрических анализаторов.

Прецизионный параметрический анализатор B2912A компании Agilent (рис. 7) представляет собой настольный двухканальный прибор умеренной стоимости, совмещающий 4-квadrантные источники и измерители тока и напряжения [4]. Это позволяет с высокой точностью измерять вольт-амперные характеристики различных устройств без изменения конфигурации подключения и до-

полнительного оборудования. Прибор имеет умеренные габариты (88×213×480 мм) и массу (5 или 6,4 кг). Потребляемая от промышленной сети мощность — 250 Вт. Дисплей приборов — жидкокристаллический, с LED-подсветкой; его размер по диагонали — 4,3 дюйма, а разрешение — 480×272 пикселя.

Благодаря широкому диапазону выходного напряжения и силы тока и высокому разрешению, анализатор B2912A обеспечивает высокую точность определения характеристик тестируемого устройства. Интуитивно понятный графический пользовательский интерфейс на основе цветного ЖКИ с различными режимами отображения повышает эффективность тестирования, отладки и определения параметров полупроводниковых приборов, компонентов и материалов.

- Измерительные возможности анализатора:
- Два канала с минимальным разрешением 10 фА/100 нВ (для источника) и 10 фА/100 нВ (для измерителя).
 - Максимальное выходное напряжение: 210 В.
 - Максимальный выходной ток: 3 А (в режиме постоянного тока), 10,5 А (в импульсном режиме).
 - Генерация сигналов произвольной формы и оцифровка сигналов с интервалом от 10 мкс.



Рис. 7. Внешний вид анализатора B2912A корпорации Agilent

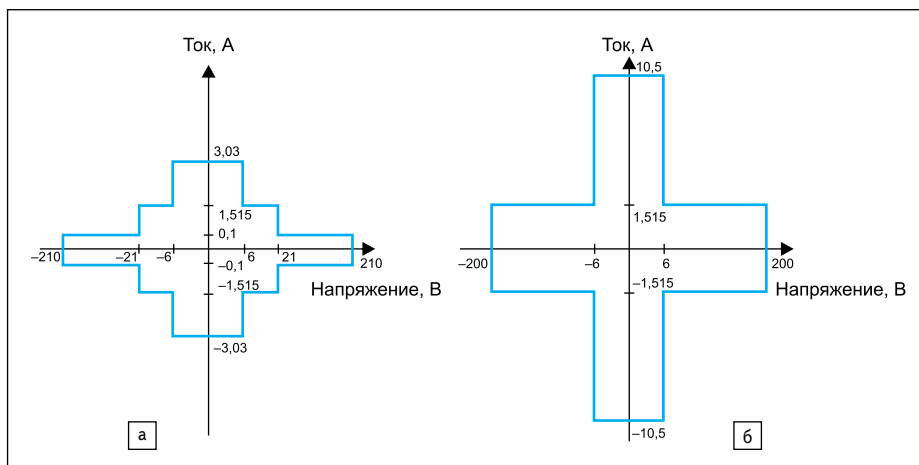


Рис. 8. Области напряжения и тока анализатора B2912A: а) в режиме постоянного тока или импульсном; б) только в импульсном режиме

Общие возможности прибора:

- Сочетание возможностей 4-квadrантного источника и измерителя тока и напряжения (рис. 8).
- Дисплей поддерживает графический и числовой режимы отображения.
- Бесплатное прикладное программное обеспечение для управления приборами с помощью ПК.
- Высокая производительность и поддержка стандартного набора команд SCP.

Многофункциональные стационарные калибраторы Fluke

В последние 20 лет массовое применение получили цифровые мультиметры, позволяющие измерять до десятка параметров, а иногда и больше. Наряду с все еще применяемыми аналоговыми измерительными приборами они требуют периодической калибровки. Вместо множества калибраторов частного применения для этого были созданы многофункциональные стационарные (рис. 9) и переносные калибраторы. Лидером по их производству стала американская компания Fluke.



Рис. 9. Рабочее место с настольным калибратором Fluke

Fluke выпускает несколько моделей универсальных стационарных калибраторов. Так, калибраторы Fluke-5500A (рис. 10) предназначены для калибровки, настройки и проверки цифровых и аналоговых портативных и настольных мультиметров, термометров (термопар и RTD), измерителей мощности, регистраторов данных, токоизмерительных клещей, различных типов самописцев, щитовых измерительных приборов, портативных промышленных калибраторов, анализаторов качества электроэнергии, измерителей сопротивления изоляции, а также многих других приборов.

Калибратор серии Fluke-5500A генерирует постоянное напряжение и ток, переменное напряжение и ток с различной формой сигнала и гармониками, имеет два независи-мых выхода напряжения или по одному на-



Рис. 10. Настольный многофункциональный калибратор серии Fluke-5500A

пряжения и тока. Он имитирует мощность с контролем фазы, а также сопротивление, емкость, сигналы термопар и терморезисторов (RTDs). К Fluke 5500 A можно заказать несколько опциональных модулей и вспомогательных принадлежностей, которые позволят получить законченное решение для калибровки большинства цифровых и аналоговых осциллографов с полосой до 600 МГц.

Fluke-5520A обеспечивает возможность калибровки цифровых мультиметров на 5,5 и 6,5 разряда. Fluke-5520A способны удовлетворить весьма широкие запросы, вплоть до поддержки лабораторных мультиметров (как аналоговых, так и цифровых) до 6,5 разряда, а также термопар и терморезисторов, калибраторов процессов, регистраторов, самописцев, ваттметров, анализаторов гармоник, токовых клещей и адаптеров, аналоговых и цифровых портативных или настольных осциллографов (опционально), щитовых приборов, графических мультиметров, анализаторов параметров качества электроэнергии и других приборов.

Мультикалибратор Fluke-5520A выдает сигналы калиброванного постоянного и переменного напряжения и тока разнообразной формы (рис. 11), в том числе с гармониками, а также способен одновременно генерировать на двух выходах различное напряжение или напряжение и ток, моделируя мощность постоянного или переменного тока с контро-

лем фазы. Помимо этого, прибор эмулирует сопротивление и емкость. Модель 5520A может измерять температуру с помощью термопар, влажность (соответствующим пробником) и давление (используя один из 28 модулей давления Fluke серии 700).

Три опции обеспечивают возможности калибровки осциллографов (до 300 МГц, 600 МГц и 1,1 ГГц) со скоростью нарастания сигнала 125 пс (с опцией генератора импульсов на туннельном диоде 5800A/TDP), а также приборов контроля качества электроэнергии (5520A-PQ, стандарты IEC). Есть возможность работы с трехфазными измерителями мощности. Прибор может генерировать мощность до 21 кВт с различной формой сигнала и гармониками при объединении трех 5520A в единую систему, благодаря функции точной фазировки. Таким образом, суммарный выходной ток системы может достигать 100 А и более для прямого тестирования токовых клещей или силовых трансформаторов.

Опциональное программное обеспечение 5500/CAL на базе Microsoft Windows упрощает документирование процедур калибровки, а также сбор информации и подготовку отчетов в процессе работы с разнообразным оборудованием. Обмен данными производится по интерфейсу RS-232 при работе с калибраторами Fluke-5500A, Fluke-5520A и Fluke-5800A. Если необходимо управление по интерфейсу IEEE или требуется автоматизация калибровки дополнительных устройств, следует использовать программное обеспечение MET/CAL.

Другой калибратор, Fluke 9100 (рис. 12), обеспечивает генерацию напряжения постоянного тока от 0 до ± 1050 В с очень малой погрешностью $\pm 0,006\%$ и напряжения переменного тока 0–1050 В с частотой от 10 Гц до 100 кГц с погрешностью $\pm 0,04\%$. Предусмотрена калибровка постоянного тока от 0 до ± 20 А (до 1000 А через токовую катушку) с погрешностью $\pm 0,014\%$ и переменного тока 0–20 А (до 1000 А через токовую катушку) с частотой от 10 Гц до 30 кГц и погрешностью $\pm 0,07\%$. Мощность постоянного тока — от 1 мВт до 20 кВт (до 1 мВт

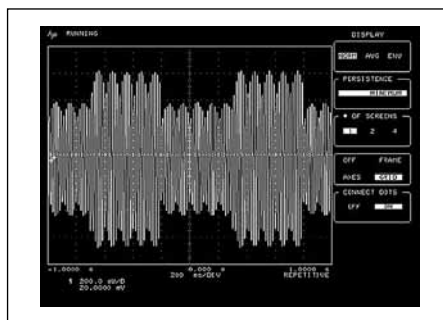


Рис. 11. Осциллограмма созданного калибратором сложного сигнала, имеющего участки модуляции и мерцания



Рис. 12. Прецизионный универсальный калибратор Fluke 9100

через токовую катушку) $\pm 0,03\%$, мощность переменного тока — от 1 мВт/мвар до 20 кВт/квар (до 1 МВт/Мвар через токовую катушку), погрешность $\pm 0,125\%$.

Резистивность измеряется калибратором в диапазоне 0–400 МОм с погрешностью $\pm 0,015\%$, проводимость — от 2,5 нс до 2,5 мс $\pm 0,04\%$, емкость — от 500 пФ до 40 мФ $\pm 0,3\%$. Частота контролируется в пределах от 0,5 Гц до 10 МГц с погрешностью $\pm 0,0025\%$ (0,00025% с модулем 100). Коэффициент заполнения импульсного сигнала — 0,05–99,95% ± 35 нс, длительность импульса — от 0,3 мкс до 1999,99 мс $\pm 0,0025\%$ (0,00025% с модулем 100). Логические уровни — TTL, CMOS, ECL (ТТЛ, ЮМОП и ЭСЛ).

Формы сигнала: синусоидальная, прямоугольная, треугольная, трапециевидная и импульсная, фаза $\pm 180^\circ \pm 0,07^\circ$. Сопротивление изоляции — от 0 кОм до 2 ГОм $\pm 0,1\%$; напряжение (измеренное) — 0–1350 В $\pm 0,6\%$; ток — от 1 мкА до 2,3 мА $\pm 1,5\%$. Переходное сопротивление — 0–4 кОм $\pm 0,035\%$, напряжение — 0–10 В $\pm 1\%$, ток — 100–350 мА.

Температура: при применении термопары — +250...2320 °C $\pm 0,17$ °C; терморезистора RTD — +200...850 °C $\pm 0,08$ °C.

Возможно применение дополнительного модуля для калибровки осциллографов. Калиброванная синусоида — от 10 Гц до 600 МГц (с модулем 600) $\pm 0,25\%$. Метки времени (маркеры) — от 2 нс до 5 с $\pm 0,0025\%$ (0,00025% с модулем 100). Потребляемая мощность — <450 В·А, габаритные размеры — 460×427×300 мм, масса — 18,5 кг.

Высокочастотные и широкополосные калибраторы

Прецизионный калибратор Fluke-5720A-03 (рис. 13) снабжен опцией широкополосного напряжения переменного тока с частотой до 30 МГц. Его отличие — радиочастотный разъем. Это один из самых дорогих калибраторов: компания Elikс предлагает его в России по цене почти 2 млн руб.

Fluke-5720 осуществляет калибровку приборов до 7,5 разряда. Напряжение постоянного тока — от 10 нВ до 1100 В $\pm 3,25$ ppm. Напряжение переменного тока — от 1 нВ до 1100 В ± 55 ppm в частотном диапазоне

от 10 Гц до 1,2 МГц. Сила постоянного тока — от 0,1 нА до 2,2 А (с усилителем 5725А — до 11 А) ± 25 ppm. Сила переменного тока — от 1 нА до 2,2 А (с усилителем 5725А — до 11 А) ± 100 ppm в частотном диапазоне от 1 Гц до 10 кГц. Сопротивление (2-/4-проводной) — 40 мкОм...100 МОм ± 8 ppm.

Широкополосная опция (5700А-03): напряжение — от 1,1 мВ до 3,5 В (–46...+24 дБм) $\pm 0,15\%$ (разрешение 10 нВ); частота — от 0,01 Гц до 30 МГц $\pm 0,1\%$. Интерфейсы — GPIB, RS-232, 5725А, 5205А, 5215А, 5220А. Потребляемая от сети мощность — <300 В·А, габариты — 630×432×178 мм, масса — 27 кг.

Широкополосная опция этого калибратора обеспечивает напряжение от 1,1 мВ до 3,5 В (–46...+24 дБм; от 30 Гц до 500 кГц) с погрешностью $\pm 0,15\%$ (разрешение 10 нВ). Частота — от 0,01 Гц до 30 МГц (1,1–3 мВ) $\pm 0,1\%$. Минимальный выходной сигнал — 300 мкВ (–57 дБм). Разрешение частоты — 11,999 для диапазона 1,1999 МГц и 119 для диапазона 30 МГц. Есть опция защиты от перегрузки (рис. 14).

Краснодарское предприятие «РИП-Импульс» выпускает широкополосный калибратор переменного напряжения Н5-3 (рис. 15). Он предназначен для воспроизведения напряжения переменного тока синусоидальной формы в широком диапазоне частот (до 50 МГц) при поверке и калибровке вольтметров пере-

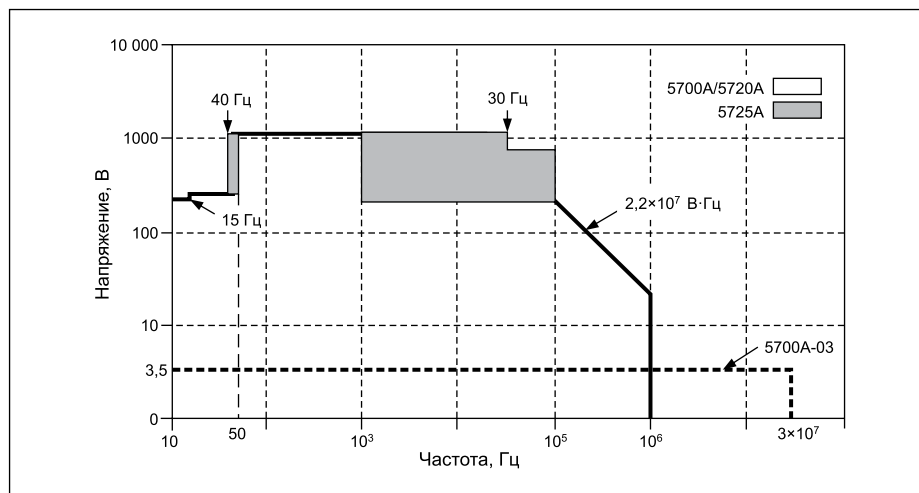


Рис. 14. Зависимость допустимого выходного напряжения переменного тока от частоты для калибраторов Fluke



Рис. 13. Калибратор Fluke 5720 с опцией радиочастотного выхода (до 30 МГц)



Рис. 15. Широкополосный калибратор Н5-3



Рис. 16. Сверхширокополосный калибратор Н5-6 — приставка к ПК

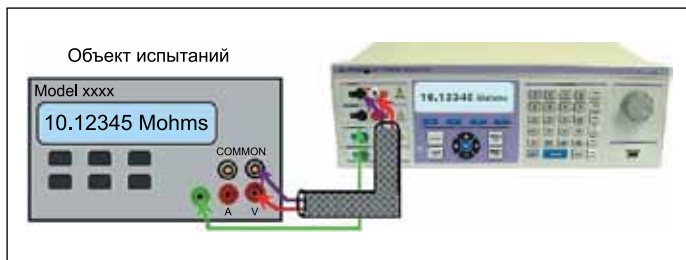


Рис. 18. Одна из схем подключения тестируемого прибора

менного тока. Дополнительной функцией прибора является воспроизведение напряжения постоянного тока любой полярности с уровнем до 3,5 В. Выход прибора рассчитан на подключение соединителей коаксиального 50-омного тракта размером 7/3 мм. Выходное напряжение нормируется при подключении нагрузки с сопротивлением 50 Ом (до 1,3 В на частоте 50 МГц).

В России разработаны калибраторы напряжения переменного тока Н5-6 (эталон 2-го разряда) и Н5-6/1 (эталон 1-го разряда) с частотой до 1500 МГц. Они максимально унифицированы по схемно-конструктивным решениям. Приборы отличаются лишь вариантами исполнения некоторых узлов, метрологическими характеристиками и функциональными возможностями. Базовая модель — калибратор Н5-6, особенности исполнения калибратора Н5-6/1 отмечаются отдельно.

Калибратор Н5-6 (рис. 16) состоит из функционально и конструктивно законченного аппаратного блока и внешнего персонального компьютера. Управление аппаратным блоком осуществляется программным способом от ПК по интерфейсам RS-232 или RS-485 через встроенное устройство управления.

Калибраторы работают в диапазоне фиксированных частот от 10 Гц до 1500 МГц и в диапазоне воспроизводимых напряжений от 3 В до 1 мВ. (На частоте 1500 МГц верхний предел ограничен значением 1 В.)

Универсальные калибраторы Transmille серии 3000

Подобные описанным калибраторам модели выпускают и другие зарубежные фирмы. Так, серию калибраторов 3000 выпускает британская компания Transmille [5] (рис. 17).

Прибор позволяет калибровать:

- 7,5-разрядные мультиметры: модель 3010;
- 5,5-разрядные мультиметры: модель 3041;
- 4,5-разрядные мультиметры: модель 3050;
- токовые клещи;
- цифровые осциллографы с рабочей полосой до 600 МГц;
- измерители мощности (ваттметры);
- RCL (сопротивления, емкости и индуктивности) — измерители/мосты переменного тока;
- источники питания и тестеры для проверки сопротивления изоляции;
- портативные калибраторы датчиков (систем управления производственными процессами);
- мегомметры, электрометры, токовые шунты и регистраторы данных;
- высоковольтные пробники, динамометрические ключи, частотомеры/таймеры, ленточные самописцы и др.

В калибраторе Transmille 3000 используются ЦАП с линейностью характеристик в долях от PPM. Технология прямого цифрового синтеза (Direct Digital Synthesis, DDS) применяется для создания обладающих высокой стабильностью сигналов различной формы с очень малым джиттером. Специальные (заказные) формы сигнала для калибровки измерителей гармоник реализуются модулями калибровки измерителей мощности для приборов 3041/3010.

Обладающий ультралинейной характеристикой усилитель мощности на основе вертикальной МОП-структуры (VMOS power amplifier) может кратковременно достигать выходного тока до 30 А, при непрерывном выходе до 20 А. Эффективная конструкция с двухступенчатым охлаждением позволила снизить внутреннюю термоЭДС и тем самым повысить кратковременную

стабильность, одновременно был снижен шум, создаваемый вентилятором системы охлаждения. «Интеллектуальная» защитная система выходов I-GUARD проверяет выходные гнезда на наличие случайных (паразитных) потенциалов перед переключением из режима ожидания в рабочее состояние, что предохраняет калибратор от повреждения.

Калибраторы серии 3000 в базовой версии обеспечивают все необходимые выходные сигналы для калибровки мультиметров, а дополнительные встраиваемые и внешние модули расширяют функциональные возможности, что позволяет калибровать осциллографы, включая амплитуду, развертку, крутизну фронта и частотный диапазон (ширину полосы частот) до 600 МГц. Отличительной чертой серии является поддержка осциллографов с ценой деления 50 В (300 В двойного размаха амплитуды).

Прибор может калибровать измерители мощности (ваттметры) постоянного и переменного тока, для чего одновременно используются выходы напряжения до 1025 В и тока до 30 А, моделируя (имитируя) мощность до 30,6 кВт (1,5 МВт с использованием 50-витковой токовой катушки). Возможно управление фазовым сдвигом (углом) до 359,9°. Модуль калибровки гармоник для калибраторов 3041 и 3010 включает пять предустановленных форм сигналов, а также поддержку загрузки заказных гармоник с ПК.

Кроме того, калибратор позволяет калибровать RCL-измерители с дополнительным индуктивным модулем, присущим только серии Transmille 3000, а также пассивные компоненты (индуктивности, резисторы и конденсаторы) и проводить измерения любым способом (рис. 18), включая мостовые методы.



Рис. 17. Внешний вид настольного калибратора серии 3000 компании Transmille

Переносные калибраторы электрических сигналов фирмы Yokogawa

Переносные калибраторы электрических сигналов CA11E/CA12E (рис. 19) японской фирмы Yokogawa Electric предназначены для проверки термопар, термометров сопротивления (встроенная компенсация температуры холодного спая) с преобразованием сигнала в единицы температуры, а также для калибровки и проверки вторичной аппаратуры (индикаторов, регуляторов) с входным и выходным сигналами термопар и термометров сопротивления. Приборы имеют ограниченные возможности, но отличаются низкой стоимостью, небольшими габаритами и весом. У них также осуществляется автоматическое управление питанием.



Рис. 19. Внешний вид переносных калибраторов Yokogawa CA11E/CA12E

Переносные калибраторы CA51 и CA71 (рис. 20) помимо этого обеспечивают возможность калибровки и проверки расходомерных узлов (расходомеров с импульсным выходом) и вторичной аппаратуры.



Рис. 20. Внешний вид переносных калибраторов Yokogawa CA51/CA71

Они имеют следующие особенности:

- Наличие всех возможных многофункциональных калибраторов при сравнительно невысокой цене.
- Одновременное измерение и генерация сигналов, что позволяет включать калибратор как калибровочный инструмент в цепь измерения от первичного преобразователя к вторичному.

- Функцию генерации предварительно запрограммированного сигнала.
 - Возможность измерения переменного напряжения до 300 В.
 - Оптимальное соотношение цены и качества.
 - Небольшие габариты и вес.
 - Открытый протокол (интерфейс RS-232) для создания специализированного ПО (только для CA71).
- Переносным калибратором CA150 (рис. 21) осуществляются следующие виды работы:
- Калибровка и поверка измерительных преобразователей давления, температуры с унифицированным выходным сигналом (токовым или по напряжению).
 - Калибровка и поверка вторичной аппаратуры с входами с унифицированным сигналом и входами для измерения сигналов термопар и термосопротивлений.
 - Калибровка и поверка термопар (с компенсацией температуры холодного спая, с преобразованием в единицы температуры по ГОСТ-Р).
 - Калибровка и поверка термосопротивлений (с преобразованием в единицы температуры по ГОСТ-Р).
 - Возможность калибровки и поверки расходомерных узлов (расходомеров с импульсным выходом и вторичной аппаратуры). Другие особенности калибраторов CA150:
 - Наличие всех возможных функциональных калибраторов по сравнительно небольшой цене.
 - Функция генерации предварительно запрограммированного сигнала.
 - Одновременная генерация и измерение сигналов.
 - Небольшие габариты и вес.
 - Открытый протокол (интерфейс RS-232) по созданию специализированного ПО.
- Калибраторы фирмы выполнены в защитных корпусах, что позволяет использовать их в промышленных и полевых условиях.



Рис. 21. Внешний вид переносных калибраторов Yokogawa CA150

Универсальный портативный калибратор DIGISTANT 4423

Портативный калибратор DIGISTANT 4423 (рис. 22) германской компании Burster позволяет поверять физические величины, такие как силу, вращающий момент или перемещение, в дополнение к обычным электрическим и температурным величинам. Прибор способен производить обширное и всестороннее документирование, которое необходимо сейчас для любой калибровки.



Рис. 22. Внешний вид портативного калибратора DIGISTANT 4423

Программное обеспечение DIGICAL позволяет загрузить результаты калибровки из универсального портативного калибратора DIGISTANT на ПК в целях документирования и обработки. До 21 измерения на объект и до 50 объектов могут быть сохранены в энергонезависимой памяти. Протестированные значения могут быть классифицированы как «хорошие/плохие» и собраны в группы.

Прибор имеет прочный алюминиевый корпус с защищенной клавиатурой для использования в полевых условиях или в лаборатории. Он обеспечивает калибровку для 13 типов термопар, 13 типов термометров сопротивления, электрического сопротивления, тока, напряжения, частоты/импульса, давления, силы, крутящего момента и перемещения. Пользовательский интерфейс очень удобный, навигация меню отображается на четком ЖК-дисплее с задней фоновой подсветкой. Универсальный калибратор с батарейным питанием без внешнего источника питания может работать в течение 10 ч, но возможна и работа от сетевого адаптера.

Особенности калибратора:

- Базовая погрешность калибратора: 0,015%.
- Одновременная выдача сигналов и измерений при сквозной калибровке.
- Сохранение программ калибровки для 50 объектов.
- Функция «включил – измерил» для всех подключаемых датчиков.
- Питание 24 В для проведения калибровки.
- Прямой ввод коэффициентов для Pt 100 (R0, A, B, C).

Калибраторы для измерителей с трансформатором тока и токовыми клещами

В энергетике широко используются бесконтактные методы измерения тока. Для этого применяют трансформаторы тока, у которых провод, в котором измеряется ток, образует первичную обмотку трансформатора тока, а вторичную обмотку образует многovitковая катушка (рис. 23). Это позволяет получить большой коэффициент трансформации и очень малые потери в первичной цепи.



Рис. 23. Катушка трансформатора тока для калибраторов Fluke

Выпускается огромное число мультиметров и амперметров переменного тока с токовыми клещами на основе расщепленной вторичной обмотки трансформатора тока, надеваемой на провод, в котором измеряется ток (рис. 24). На основе датчика Холла созданы токовые клещи и для бесконтактного измерения постоянного тока. Все они нуждаются в средствах периодической поверки и калибровки.

Портативный калибратор напряжения (0–100 мВ, 0–10 В) и токовой петли (0/4–20 мА) Fluke-715 (рис. 25) имеет погрешность 0,015%. Диапазон измерения напряжения — от 10 мкВ до 10 В, а тока — от 1 мкА



Рис. 24. Измерение тока в одиночном проводе бесконтактным методом



Рис. 25. Калибратор напряжения и токовой петли Fluke-715



Рис. 26. Взрывобезопасный калибратор токовой петли Fluke-707-Ex

до 24 мА. Корпус, рассчитанный на применение в полевых и стационарных условиях, имеет размеры 187×87×32 мм и вес 0,33 кг.

Выпускается взрывобезопасный калибратор токовой петли Fluke-707-Ex (рис. 26). Он обеспечивает диапазон токов 0/4–20 мА с погрешностью 0,015% и измеряет напряжение от 1 мВ до 28 В и ток от 1 мкА до 24 мА.

Мультиметры-калибраторы

Современные цифровые мультиметры и многофункциональные калибраторы этих устройств очень похожи друг на друга и имеют однотипное устройство. Поэтому вполне естественным является появление комбинированных моделей, объединяющих мультиметры и калибраторы. Компания Fluke выпускает с десяток таких приборов, отличающихся в основном диапазоном измеряемых параметров.

Мультиметр-калибратор Fluke-789 (рис. 27) служит для измерения напряжения AC/DC (0–1000 В), тока (0–1000 А), сопро-



Рис. 27. Мультиметр-калибратор Fluke-789

тивления (0–40 МОм), частоты (от 0,5 Гц до 20 кГц), а также для прозвонки цепей, проверки диодов и измерения токовой петли (4–20 мА). Прибор имеет базовую погрешность при измерениях 0,1% при погрешности 0,05% калибратора токовой петли 0/4–20 мА. Питание токовой петли — 24 В, есть режим HART. Габариты прибора — 203×100×50 мм, вес — 600 г. Цена модели — около \$1000.

Новый калибратор-мультиметр с клещами Fluke-773 (рис. 28) служит для измерения малых токов (с помощью клещей) в диапазонах 0–20,99 мА ±0,2% и 21–100 мА ±1%. Класс точности — 0,2%. Разрешение и чувствительность — порядка 0,01 мА. Он проводит измерение малых токов (последовательно с помощью измерительных гнезд): 0–24 мА ±0,2%. Генерация/имитация тока — 0–24 мА ±0,2%, максимальное напряжение — 50 В DC. Генерация напряжения — 0–10 В, погрешность — 0,2% (максимальный ток — 2 мА).

Измерение напряжения — 0–30 В, погрешность — 0,2%. Диаметр измеряемого проводника — до 4,5 мм. Fluke-773 имеет функцию Hold.



Рис. 28. Мультиметр-калибратор Fluke-773 с клещами



Рис. 29. Портативный бюджетный калибратор АКТАКОМ AM-7070

Прибор оборудован двойным дисплеем с задней подсветкой и встроенным фонарем для точечного освещения. Есть автоматическое отключение, выключение подсветки по времени. Степень защиты — IP40. Рабочая температура — -10...+50 °С.

Питание: щелочная батарея AA 4×1,5 В, IEC LR6. Ресурс: 12 ч при генерации тока (при 500 Ом). Размеры — 44×70×246 мм, масса — 410 г.

Новый, выпускаемый в России портативный калибратор АКТАКОМ AM-7070 (рис. 29) предназначен для калибровки напряжения (100 мВ...15 В, погрешность 0,02%); тока (24 мА, погрешность 0,015%); петли (24 В). Он имеет входной импеданс 2 МОм/<100 пФ и защиту от перенапряжения 30 В и от перегрузки по току 125 мА. Питание: 6×1,5 В (батарея AAA). Габаритные размеры — 250×97×45 мм, масса — около 500 г. Стоимость прибора — меньше 15 тыс. руб.

Калибраторы температуры и давления

В последнее время резко возросло количество применяемых датчиков (температу-



Рис. 30. Контроль неэлектрических величин в производственных условиях



Рис. 31. Калибратор термопар Fluke-714

ры, давления, влажности и т. д.), и не только в промышленной и технологической сферах производства и распределения, но и в системе ЖКХ. Стал обязательным учет расхода газа и его давления, расхода горячей воды и контроль ее температуры в жилых помещениях. Устанавливаются датчики соответствующих величин как коллективного, так и индивидуального применения. Для их контроля применяются различные калибраторы температуры и давления (рис. 30).



Рис. 32. Калибратор температуры Fluke-724

Калибратор измерителей температуры Fluke-714 (рис. 31) — это портативный калибратор термопар. Он осуществляет измерение/моделирование сигнала термопар девяти типов: J, K, T, E, R, S, B, L, U, а также измерение/моделирование напряжения от -10 до 75 мВ с точностью 0,025%. Размеры прибора — 187×87×32 мм, вес — 0,33 кг, питание батарейное.

Калибратор Fluke-712 предназначен для калибровки терморезистивных датчиков температуры. Он выполняет измерение/моделирование сигнала датчиков Pt 100, 200, 500 и 1000 (385); Pt 100 (3926); Pt 100 (3916) JIS; Ni 120 (672) и измерение/моделирование сопротивления с разрешением 0,1 Ом в диапазоне от 15 до 3200 Ом. Размеры Fluke-712 — 187×87×32 мм, вес — 0,33 кг. Внешне прибор похож на калибратор Fluke-714. Подобные описанным калибраторам приборы выпускают и другие компании.

Схема подключения калибратора температуры Fluke-724 (рис. 32) к розетке термодатчика показана на рис. 33. Возможны и иные варианты подключения, описанные в [6].

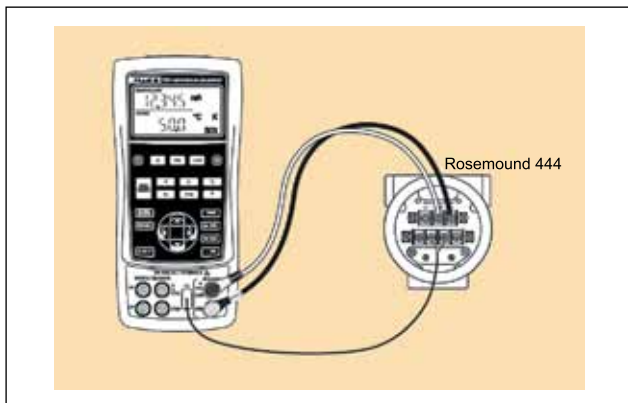


Рис. 33. Схема подключения калибратора Fluke-724 к розетке термодатчика



Рис. 34. Включение обычного калибратора давления



Рис. 35. Работа с калибратором давления в производственных условиях



Рис. 36. Калибратор давления Fluke-719 со встроенной помпой (насосом)

Обычные калибраторы давления подключаются по схеме, показанной на рис. 34. Применяется ручной насос (помпа) для создания и применения нужного давления.

Работа с ручным насосом (помпой) неудобна в стесненных условиях производства (рис. 35). Она отвлекает пользователя от процесса калибровки. Электрический калибратор давления Fluke-719 (рис. 36) со встроенным электрическим насосом современной конструкции упрощает калибровку давления. Во избежание избыточного давления электрический насос можно запрограммировать на достижение заданного или предельного значения. Уникальная конструкция очистного отверстия сводит к минимуму отказы и облегчает очистку калибратора модели 719. Компактный и легкий корпус, а также возможность выполнения калибровки одной рукой делают эту модель идеальным инструментом для тех профессионалов, которые дорожат своим временем.

Основные характеристики калибратора давления Fluke-719:

- Наивысшая в своем классе точность при использовании в качестве измерителя силы тока (мА) и источника слабого тока — 0,015%.
- Диапазоны давления: 30 и 100 фунтов на квадратный дюйм (PSI).
- Программируемый предел давления насоса калибратора.
- Расширенный диапазон измерений с любым из 29 модулей измерения давления 700Pxx.
- Источник слабого тока (мА) с одновременным измерением давления используется при проверке клапанов и устройств I/P.
- Имитация слаботочных электрических сигналов для наладки управляющих цепей с силой тока 4–20 мА.

Переносные калибраторы процессов и регистрирующие калибраторы

Наиболее функциональны калибраторы технологических процессов [7]. Например, с помощью модели Fluke-725 можно выполнять измерения и генерировать сигналы силы тока 0–24 мА, напряжения (0–100 мВ, 10 В (до 30 В в режиме измерения)), температуры (датчики RTD и термопары), частоты, сопротивления, а если воспользоваться поставляемыми дополнительно 29 модулями — то и давления. Базовая погрешность прибора — 0,015%. На разделенном экране Fluke-725 можно одновременно наблюдать входные и выходные сигналы.

Мультикалибратор процессов Fluke-726 (рис. 37) обеспечивает калибровку практически всех описанных выше величин. Базовая погрешность прибора снижена до 0,01%. Прибор также имеет два отдельных канала; можно одновременно проводить измерение,

генерацию и просмотр сигналов процесса. Fluke-726 может измерять и генерировать давление с помощью любого из 29 модулей Fluke 700Pxx. Эта модель имеет режим HART (Highway Addressable Remote Transducer), при котором осуществляется вставка резистора с сопротивлением 250 Ом в мА-измерение и источник, что необходимо для совместности с приборами HART.

Многофункциональный документирующий калибратор технологического оборудования Fluke-744 (рис. 38) служит для калибровки и регистрации параметров контрольно-управляющей аппаратуры и приборов различного назначения. Fluke-744 имеет двусторонний интерфейс с компьютером и многострочный ЖКИ-дисплей. Этот калибратор позволяет скачивать процедуры, списки и инструкции из ПК, имеющиеся в программном обеспечении, или пересылать на компьютер данные для печати, архивирования и анализа. Расширенная память прибора может хранить недельные данные по калибровке и измерительным процедурам. Основным его отличием от модели Fluke-743В является многосторонняя поддержка протокола HART. Fluke-744 обеспечивает калибровку и измерение подавляющего числа описанных выше параметров. Цена прибора — около 250 тыс. руб.

Российский бюджетный мультиметр-калибратор процессов АКТАКОМ АМ-7079 имеет 4-разрядный ЖКИ. Базовая погрешность у него заметно выше: 0,2% на постоянном токе. Измерение постоянного напряжения 0,01 мВ...400 В; переменного — от 0,1 мВ до 400 В (40–500 Гц); постоянного тока — 0,01–400 мА, переменного — 0,01–400 мА (40–200 Гц); сопротивления — от 0,1 Ом до 40 МОм; частоты — от 0,01 Гц до 10 кГц, коэффициента заполнения — 0,1–99%; температуры (термопары R, S, K, E, J, T, N, В типов),



Рис. 37. Высокоточный мультикалибратор процессов Fluke-726



Рис. 38. Документирующий калибратор процессов Fluke-744



Рис. 39. Портативный регистрирующий калибратор/измеритель Fluke-754

терморезисторов (PT100, Cu50). Есть функции прозвонки, тестирования диодов, питания токовой петли и др. Питание — от батарей, аккумуляторов или через AC/DC-адаптер.

Калибратор процессов АКТАКОМ АМ-7111 имеет двойной ЖКИ пяти разрядов (50000 отсчетов) с подсветкой. Габаритные размеры — 205×95×42 мм. Масса — около 500 г. Стоимость — менее 12 тыс. руб.

Компания Fluke выпускает также несколько регистрирующих калибраторов серии Fluke-700. Например, Fluke-754 (рис. 39) измеряет напряжение в диапазоне 0–300 В, ток 0–110 мА, сопротивление 0–10 кОм, частоту 0–50 кГц, давление (с помощью модуля Fluke-700), температуру. Источник напряжения — 0–15 В, тока — 0–22 мА, сопротивления — 0–10 кОм, частоты — 0–50 кГц. Осуществляется запись минимума/максимума, настроек, результатов калибровки. Есть интерфейс связи с ПК. Поддерживается обмен данными по протоколу HART. Степень защиты — CAT II 300 В.

Размеры Fluke-754 — 245×136×63 мм, вес — 1,2 кг. Розничная цена этого прибора — около 220 тыс. руб.

Выводы

Калибраторы постепенно превратились в новый класс настольных и портативных многофункциональных приборов. С их помощью можно не только осуществлять калибровку, но и измерять любые электрические

величины, а также температуру и давление. Они позволяют своевременно калибровать множество аналоговых и цифровых приборов и датчиков электрических и неэлектрических величин и применяются при тестировании, настройке и исследовании таких приборов и устройств. ■

Литература

1. Калибратор напряжения и тока многофункциональный «Парма ГС8.033». Руководство по эксплуатации. ООО «Парма», Санкт-Петербург — www.parma.spb.ru
2. Афонский А. А., Дьяконов В. П. Электронные измерения в нанотехнологиях и микроэлектронике. М.: ДМК-Пресс, 2011.
3. Дьяконов В. П. Сверхскоростная твердотельная электроника. М.: ДМК-Пресс, 2013.
4. Agilent B2900A Series. Precision Source/Measure Unit. Data Sheet. Agilent Technologies — http://agilent.datatec.de/shop/artikelpdf/b2901a_d.pdf
5. Серия 3000 прецизионных универсальных калибраторов фирмы Transmille. 2007 — www.transmille.net
6. Temperature calibration. Application mode. Fluke — http://assets.fluke.com/AppNotes/ProcessTools/1560369_.pdf
7. Калибраторы технологических процессов. Fluke — <http://www.en4tel.com/pdfs/calibrators.pdf>