

Согласование, калибровка и подстройка

Электронная калибровка: точность, безопасность и доступность технологического оборудования

Мы требуем безопасности на наших фабриках. Покупателям нужны качественные товары, что требует точного технологического оборудования. В то же время оборудование должно иметь разумную цену. Как производителям удаётся поставлять «совершенное» оборудование за разумную цену? Ответ заключается в одном слове: *калибровка*. Электронная калибровка позволяет удалённо калибровать и тестировать устанавливаемые в местах эксплуатации приборы (field devices), такие как датчики, клапаны и исполнительные устройства. Все эти приборы, а также программируемые логические контроллеры (ПЛК) имеют ограниченные габариты, поэтому очень важно, чтобы устройства электронной калибровки имели небольшие размеры.

Все реальные компоненты, как механические, так и электронные, имеют технологические допуски. Чем больше величина допуска, тем дешевле (доступнее) компонент. Когда компоненты собираются в систему, их индивидуальные допуски суммируются, давая в итоге общий допуск системы. При надлежащем проектировании схем настройки и калибровки возможна коррекция системного допуска, что позволяет делать оборудование безопасным, точным и доступным по цене.

Во многих случаях калибровка может снизить затраты. Она может помочь избавиться от производственных допусков или использоваться для применения менее дорогих компонентов, сокращения времени тестирования, повышения надёжности, увеличения степени удовлетворения покупателей, снижения числа возвратов изделий от заказчиков, снижения затрат на гарантийное обслуживание и ускорения поставок заказанных изделий.

При заводской настройке механические потенциометры всё чаще заменяют на устройства калибровки и потенциометры с цифровым управлением. Такой цифровой подход приводит в результате к более высокой надёжности и повышенной безопасности обслуживающего оборудования персонала. Повышенная функциональная надёжность оборудования может снизить остроту вопроса об ответственности за потери, вызванные внеплановыми простоями оборудования. Другой плюс — сокращение времени испытаний и расходов на исключение ошибок, обусловленных человеческим фактором. Автоматическое испытательное оборудование может проводить испытания быстро и точно, раз за разом. К тому же, цифровые устройства нечувствительны к пыли, грязи и влаге, которые могут приводить к поломкам механических потенциометров.

Можно выделить три большие области проведения испытаний и калибровки: испытания изделий на заключительном этапе их производства, периодическое самотестирование и непрерывный мониторинг с подстройкой параметров. На практике они используются как вместе, так и по отдельности.

Компенсация технологических допусков компонентов с помощью калибровки на заключительном этапе производства

При калибровке, выполняемой на заключительной стадии производства, проводится коррекция ошибок, причиной которых являются суммарные технологические допуски многих компонентов. Для калибровки устройства, чтобы оно соответствовало спецификациям производителя, может потребоваться выполнение одной или нескольких настроек.

Представим, что в нескольких схемах какого-то оборудования используются резисторы с пятипроцентным допуском. При проектировании мы провели расчёт схем и выполнили тестирование методом Монте-Карло. То есть, мы случайным образом меняли значения резисторов в пределах их допусков, чтобы исследовать их влияние на выходной сигнал. Результатом расчёта стало семейство графиков, отражающих ошибки, соответствующие наихудшим случаям, вызванным допусками резисторов. Зная всё это, нами было принято решение делать схемы такими, какие они есть, а далее просто подстроить смещение и размах (усиление) выходного сигнала, так чтобы добиться соответствия спецификации на систему, при проведении испытаний на заключительном этапе производства. Таким образом, на заключительных испытаниях мы проводим измерения, и у нас есть человек, который, используя два механических потенциометра, устанавливает размах и смещение выходного сигнала. Калибровка выполнена, но решили ли мы проблему, замаскировали её или внесли ещё большую неопределённость?

Опытным технологам известно, что человеческий фактор — это вполне реальная проблема. Непреднамеренная ошибка может расстроить самые благие намерения. Заставлять человека выполнять скучную, повторяющуюся работу — значит напрашиваться на неприятности. Лучше всего автоматизировать такую задачу. Электрически настраиваемые устройства калибровки позволяют быстро проводить испытания, что улучшает повторяемость, снижает затраты и повышает безопасность оборудования за счёт исключения человеческого фактора.

Повышение надёжности и долговременной стабильности с помощью самотестирования при подаче питания и непрерывной или периодической калибровки

Технологические допуски компенсируются калибровкой при проведении испытаний на заключительной стадии производства, и эти данные используются при подаче питания на систему. Параметры окружающей среды на месте эксплуатации также приводят к необходимости тестирования и калибровки. К возникновению отклонений смещения и размаха выходного сигнала приводят такие факторы, как окружающие температура и влажность, а также старение компонентов схемы (временной дрейф). В память некоторых схем заносят контрольную или усреднённую информацию, которую можно периодически обновлять. Эти факторы принимаются во внимание, когда проводится самотестирование схемы при подаче питания и при периодическом или непрерывном тестировании. Тестирование, проводимое в процессе эксплуатации, может быть простым, например измерение температуры с соответствующими компенсационными мероприятиями, или более сложным.

В состав многих изделий входит встроенный микропроцессор, который может быть полезен при калибровке. Например, показания весов можно настроить так, чтобы исключить вес упаковки взвешиваемого продукта, скажем, пластиковой коробки или стеклянного сосуда. Вычитание веса упаковки (тары) из общего веса (брутто) необходимо для аккуратного измерения на весах чистого веса (нетто). Поскольку вес упаковки может со временем меняться из-за производственных изменений или из-за смены поставщиков, желательно время от времени обновлять данные о весе тары или контейнера.

В качестве другого примера можно привести ключ, который закорачивает вход усилителя на землю для измерения напряжения смещения на выходе. Это может делаться во время самотестирования при подаче питания с целью компенсации дрейфа, вызванного старением компонентов. Или это может делаться периодически для компенсации температурного дрейфа. Если температурный дрейф предсказуем и обладает свойством повторяемости, то микропроцессор может помочь при тестировании, измеряя температуру и управляя устройством калибровки без использования обратной связи.

Отклонение коэффициента усиления в системе можно откалибровать, подключив сигнал с известными параметрами к входному каскаду и измерив уровень выходного сигнала. Это делается при подаче питания или периодически, во время перерывов в работе.

Калибровочные ЦАП и потенциометры обеспечивают точную автоматическую настройку

Калибровочные цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП) и цифровые потенциометры обладают уникальными свойствами, которые позволяют проводить с их помощью согласование, настройку и калибровку. Первое преимущество — наличие энергонезависимой памяти, которая автоматически восстанавливает калибровочные установки при подаче питания. На **Рис. 1** показано второе преимущество: возможность задавать шаг калибровки и диапазон подстраиваемого параметра, что улучшает производственную безопасность.

На обычные ЦАП можно подать только одно опорное напряжение (V_{REF}), которое определяет верхнюю границу рабочего диапазона ЦАП. Нижняя граница рабочего

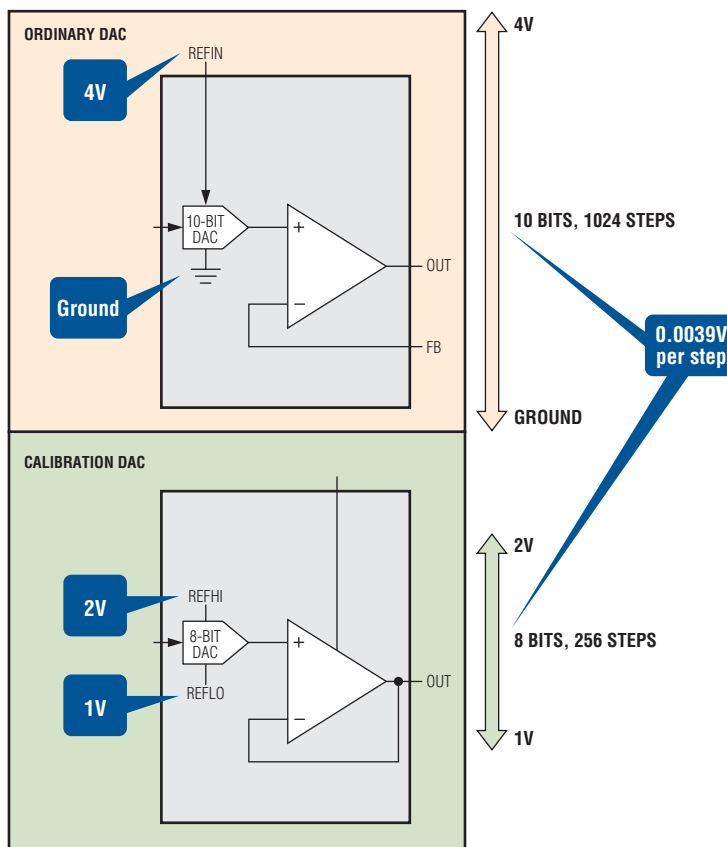


Рис. 1. Сравнение диапазонов калибровки обычного и калибровочного ЦАП.

диапазона ЦАП представляет собой фиксированное напряжение, обычно это земля. При подстройке вблизи середины рабочего диапазона (между V_{REF} и землёй) большая его часть игнорируется и не используется, а величина шага чётко распределена по всему диапазону. Например, при $V_{REF} = 4$ В для 10-битного ЦАП получаем шаг, равный 0,0039 В. Для технологического оборудования критически важным является исключение всех ошибок, которые могут повлиять на его безопасность. Удаление неиспользуемого диапазона подстройки исключает всякую вероятность того, что схема может оказаться сильно расстроенной.

В случае калибровочных ЦАП и цифровых потенциометров можно для верхней и нижней границ диапазона брать произвольные напряжения, тем самым устраняя избыточный диапазон подстройки. На **Рис. 1**, к примеру, нижнее напряжение выбрано равным 1 В, а верхнее — 2 В. Чтобы в диапазоне от 1 до 2 В получить шаг 0,0039 В, необходим всего лишь недорогой 8-битный прибор. К тому же это повышает безопасность, исключая любую вероятность того, что схема может оказаться сильно расстроенной. Верхняя и нижняя границы калибровочного ЦАП произвольны, и поэтому можно обеспечить центрирование диапазона, в котором требуется проводить калибровку схемы. Если анализ допусков для схемы показывает, что для калибровки необходим диапазон от 1,328 до 1,875 В, то именно он и может быть принят. 256-шаговый прибор даст разрешение 0,00214 В. Таким образом, разрешение подстройки может быть оптимизировано для каждого конкретного приложения.

Замена механических потенциометров полностью электронными эквивалентами: снижение стоимости и увеличение точности

В промышленных системах настраиваемые приборы с циф-

ровым управлением обладают несколькими преимуществами по сравнению с их механическими аналогами. Самое большое преимущество — меньшая стоимость. Оборудование автоматического тестирования может раз за разом выполнять точную калибровку, тем самым исключая значительные затраты, связанные с ручной настройкой, выполняемой людьми, которые склонны допускать ошибки. К тому же, цифровые потенциометры позволяют проводить периодическое тестирование с большей частотой или в течение более длительного срока службы оборудования, так как они могут гарантировать 50 000 циклов записи. Самые лучшие механические потенциометры выдерживают не более лишь нескольких тысяч операций настройки.

Другие преимущества в сравнении с механическими потенциометрами — универсальность размещения и размеры. Цифровые потенциометры могут быть установлены на печатной плате непосредственно в тракте прохождения сигнала, т. е. именно там, где они и нужны. В противоположность этому, в случае механических потенциометров может понадобиться обеспечить к ним доступ человека, что, в свою очередь, может потребовать использования длинных дорожек на печатных платах или коаксиальных кабелей. В чувствительных схемах ёмкость, временные задержки или слабая помехозащищённость этих кабелей может привести к ухудшению технических параметров оборудования.

Цифровые потенциометры также лучше сохраняют калибровочные данные, тогда как сопротивление механических потенциометров может слегка изменяться даже после того, как их залили фиксирующим составом. Скользящий контакт будет сдвигаться по мере ослабления натяжения пружины, при изменении температуры или под воздействием вибрации при перевозке оборудования. Все эти факторы не оказывают никакого влияния на калибровочные данные, хранимые

в цифровых потенциометрах.

Для повышения степени безопасности можно воспользоваться однократно программируемыми (ОТР — One-Time Programmable) цифровыми потенциометрами. В них постоянно хранятся однажды записанные калибровочные значения, что не даёт оператору возможность проводить дальнейшую подстройку. Для изменения калибровочного значения требуется физическая замена однократно программируемого цифрового потенциометра. Существуют специальные модели однократно-программируемых цифровых потенциометров, которые при сбросе по питанию всегда возвращаются к сохранённому в них значению, но в то же время позволяют операторам делать ограниченную подстройку по своему усмотрению.

Прецизионные источники опорного напряжения для цифровой калибровки

Измерения показаний датчиков и напряжений с помощью прецизионных аналого-цифровых преобразователей (АЦП) хороши ровно настолько, насколько хороши используемые для сравнения источники опорного напряжения (ИОН). Аналогично, выходные управляющие сигналы точны ровно настолько, насколько точны опорные напряжения, прикладываемые к ЦАП, усилителям или кабельным передатчикам.

Обычные источники питания не годятся для работы в качестве прецизионных ИОН. Точность типичного источника питания составляет всего лишь 5...10%. Их выходное напряжение изменяется с изменением нагрузки и входного напряжения, и у них довольно высокий уровень шумов.

Доступны и просты в использовании компактные, маломощные, малозащумящие и обладающие низким температурным дрейфом ИОН. К тому же, в некоторых из них имеются встроенные датчики температуры, помогающие отслеживать изменения окружающей среды.

В целом, существует три типа серийных калибровочных ИОН, каждый из которых обладает своим уникальным набором преимуществ для различных промышленных приложений. Наличие выбора серийно выпускаемых ИОН даёт разработчикам возможность оптимизировать и калибровать свои прецизионные схемы.

Первый тип ИОН обеспечивает небольшой диапазон подстройки: обычно от трёх до шести процентов. Это является преимуществом для схем настройки усиления в промышленных системах формирования изображений. К примеру, связка из видеоЦАП и подстраиваемого ИОН позволяет точно настроить общее усиление системы простой подстройкой опорного напряжения.

Второй тип — подстраиваемые ИОН, которые допускают подстройку в широком диапазоне (например, от 1 до 12 В). Это является преимуществом для эксплуатируемых в полевых условиях приборов, в состав которых входят датчики с большими допусками, и которым приходится работать с нестабильным питанием. Например, портативным приборам, предназначенным для проведения ремонта и технического обслуживания, приходится работать от батарей, автомобильных аккумуляторов или аварийных электрогенераторов.

В состав третьего типа ИОН, называемого E²CRef, входит запоминающее устройство, позволяющее

посредством подаваемой через специальный вывод команды устанавливать любое напряжение между 0,3 В и $[V_{IN} - 0,3 \text{ В}]$, а затем неограниченно долго удерживать его на выходе. Опорные источники E²CRef хорошо подходят для тестового и контрольного оборудования, в котором необходимо задавать базовые значения или пороги срабатывания предупреждающей сигнализации.

На **Рис. 2** показаны преимущества использования E²CRef-источников на производстве. В этом примере производитель источников питания использует E²CRef для создания доступных источников питания, которые сохраняют настройки, установленные при тестировании на заключительной стадии изготовления. Производитель изготавливает настраиваемый источник питания и помещает его на склад. После того, как приходит заказ от покупателя, перед доставкой выходное напряжение настраивается системой автоматического тестирования.

Производитель источников питания, проводя калибровку на этапе заключительных испытаний, получает сразу две выгоды. Во-первых, он снижает затраты, используя компоненты с большими допусками, поскольку калибровка корректирует суммарное отклонение. Во-вторых, он ускоряет поставку источника заказчику, настраивая стандартное изделие индивидуально под конкретные требования.

Исполнение заказа точно в срок сегодня важно, как никогда ранее,

поскольку порой сами заказы можно получить только при условии быстрой поставки. Если конкуренту не удалось вовремя выполнить заказ, а это сделали вы, то можно ожидать повторных заказов. К тому же, увеличение складского оборота ведёт в итоге непосредственно к росту итоговой прибыли.

Закключение

Калибровка — средство установки конечных параметров изделия. У реальных устройств есть технологические отклонения (допуски), которые могут быть нивелированы калибровкой во время испытаний на финальной стадии производственного процесса с помощью внешнего тестового оборудования лабораторной точности. Из-за дрейфа, причиной которого могут быть изменения условий работы, таких как температура или влажность, или старение компонентов, требуется калибровка во время эксплуатации. Электронно-настраиваемые калибровочные компоненты обеспечивают быстрое проведение эксплуатационной калибровки, включая самотестирование при подаче питания и непрерывную или периодическую калибровку. Периодическая калибровка может также включать калибровку с помощью верифицированного стандартного лабораторного измерительного оборудования. Электронная калибровка помогает нам достичь нашей цели: она позволяет иметь доступное технологическое оборудование, которое к тому же отвечает всем требованиям точности и безопасности.



Рис. 2. Иллюстрация преимуществ использования источников опорного напряжения E²CRef при производстве изделий.

Рекомендуемые решения

Микросхема	Описание	Особенности	Преимущества
Цифровые калибровочные потенциометры			
MAX5481	Цифровой калибровочный потенциометр на 1024 отсчёта (10 бит) с SPI™ или Up/Down-интерфейсом	Ток потребления в ждущем режиме 1,0 мкА (макс.); ток потребления во время записи в память 400 мкА (макс.)	Благодаря минимальному энергопотреблению может использоваться в портативных приборах с батарейным питанием
MAX5477	Сдвоенный цифровой калибровочный потенциометр на 256 шагов (8 бит) с интерфейсом I ² C	Защита EEPROM от записи, работа от одного источника питания (2,7...5,25 В)	Защита EEPROM обеспечивает безопасное хранение калибровочных данных
MAX5422	Одиночный цифровой калибровочный потенциометр на 256 шагов (8 бит) с интерфейсом SPI	Миниатюрный (3 × 3 мм) корпус TDFN	Малая занимаемая площадь на печатной плате, можно использовать в портативных приборах
MAX5427	Однократно программируемый цифровой калибровочный потенциометр на 32 шага (5 бит)	Однократное программирование либо однократное программирование плюс возможность подстройки	За счёт выполнения двух функций снижается число компонентов
DS3502	Цифровой калибровочный потенциометр на 128 шагов (7 бит) с интерфейсом I ² C	Возможность задания высокого выходного напряжения (до 15,5 В)	Возможна прямая калибровка высоковольтных схем
Калибровочные ЦАП			
MAX5105/MAX5115	Четыре 8-битных калибровочных ЦАП с независимыми входами подачи высокого и низкого опорных напряжений	Выходные буферы, обеспечивающие размах сигнала «от шины до шины»; выбор интерфейса I ² C или SPI	Выбираемый диапазон напряжений позволяет регулировать шаг подстройки и предотвращать установку небезопасных значений
MAX5106	Четыре 8-битных калибровочных ЦАП с независимо настраиваемыми диапазонами напряжений	Возможность установки шага калибровки; миниатюрный (5 × 6 мм) корпус	Малая занимаемая площадь на печатной плате, можно использовать в портативных приборах
MAX5116	Четыре 8-битных калибровочных ЦАП с независимыми входами подачи высокого и низкого опорных напряжений	Четыре усилительные схемы калибруются с помощью одного компонента	Снижение затрат благодаря меньшему числу компонентов; уменьшение занимаемой площади на плате и упрощение управления
MAX5109	Два 8-битных калибровочных ЦАП с независимыми входами подачи высокого и низкого опорных напряжений	Однополярное питание (2,7...5,25 В); 200 мкА на ЦАП, ток потребления в «спящем» режиме менее 25 мкА, выходные буферы «от шины до шины»; интерфейс I ² C	Подходит для использования в портативных приборах с батарейным питанием; задание диапазона и управление шагом подстройки
DS1851	Два калибровочных ЦАП с контролем температуры	У каждого ЦАП своя память EEPROM, которая может содержать температурные коэффициенты для температурно-зависимой калибровки	Влияние системной температуры может быть скорректировано без применения каких-либо дополнительных внешних устройств, что уменьшает площадь платы и снижает затраты
Источники опорного напряжения (обычные и E²CRef)			
MAX6160	Подстраиваемый источник опорного напряжения (1,23...12,4 В)	Низкое (200 мВ) падение напряжения; потребляемый ток (75 мкА) по существу не зависит от изменений входного напряжения	Увеличение срока службы батареи в портативном оборудовании
MAX6037	Подстраиваемый источник опорного напряжения (1,184...5 В)	«Спящий» режим (≤ 500 нА), низкое (≤ 100 мВ) падение напряжения при токе нагрузки 1 мА; 5-выводной корпус SOT23 (9 мм ²)	Возможность батарейного питания и малые габариты позволяют использовать микросхему в портативных приборах
MAX6173	Прецизионный источник опорного напряжения с датчиком температуры	Начальная точность ±0,05% (макс.), температурная стабильность ±3 ppm/°C (макс.)	Возможна аналоговая подстройка коэффициента усиления системы при сохранении цифровой точности АЦП и ЦАП
MAX6220	Малозумящий прецизионный источник опорного напряжения	Диапазон входного напряжения 8...40 В; ультранизкий (размах 1,5 мкВ) шум (0,1...10 Гц)	Надёжное функционирование при нестабильном питании (батареи, автомобильные аккумуляторы или аварийные электрогенераторы)
DS4303	Программируемый источник опорного напряжения	Широкий диапазон устанавливаемых выходных напряжений; границы диапазона отличаются от напряжений на шинах питания на 300 мВ; выходное напряжение может быть установлено с точностью ±1 мВ	Использование простой линии ввода/вывода позволяет навсегда запомнить калибровочное напряжение