

Как выбрать и спроектировать оптимальную систему измерения температуры на основе резистивных термодатчиков

Джелени РОДРИГЕЗ
(Jelenie RODRIGUEZ)
Мэри МакКАРТИ
(Mary McCARTHY)
Перевод: Евгений ИВАШЕНКО
eugeny.ivashenko@eltech.msk.ru

Статья посвящена проблемам проектирования систем измерения температуры на основе резистивных датчиков температуры (resistance temperature detector, RTD). Рассматривается выбор RTD, а также преимущества и недостатки различных конфигураций. Помимо этого, в деталях описана оптимизация и оценка системы на основе RTD.

Актуальность измерения температуры RTD-датчиками

Измерение температуры играет важную роль во многих областях применения, таких как промышленная автоматика, приборостроение, медицина или обслуживание оборудования в соответствии с его техническим состоянием. При наблюдении за условиями окружающей среды и при коррекции температурного дрейфа в системе крайне важна высокая точность и прецизионность измерений. Есть несколько типов температурных датчиков, которые можно использовать для этих целей: термопары, резистивные датчики температуры (RTD), полупроводниковые датчики температуры, термисторы. Тип и конструкцию датчика выбирают исходя из измеряемого диапазона температур и необходимой точности прибора. Так, для температурного диапазона $-200...+850$ °C оптимальны RTD, обеспечивающие высокую точность и стабильность измерений в данных пределах.

Существует несколько проблем, с которыми при измерении температуры постоянно сталкиваются специалисты:

- Выбор значений тока и напряжения. RTD представляет собой пассивное устройство, которое само не генерирует электрический ток. Для измерения сопротивления используется ток или напряжение возбуждения — ток небольшой силы пропускается через детектор и вызывает на нем падение напряжения. Как выбрать оптимальное значение тока/напряжения?
- Какая схема подключения — двух-, трех- или четырехпроводная — станет наилучшей для конкретного случая?

- Какая обработка требуется для сигнала RTD?
- Как подобрать указанные выше переменные, чтобы соблюсти технические требования для аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и прочих элементов цепи?
- Как объединить несколько датчиков в одной системе? Могут ли некоторые блоки совместно использоваться несколькими датчиками? И как это повлияет на общие показатели работы системы?
- Какова ожидаемая ошибка измерения для данной схемы?

Руководство по выбору RTD

Обзор RTD

У RTD существует четко определенная зависимость между сопротивлением датчика и температурой. Наиболее широко используются платиновые датчики Pt100 и Pt1000, подключаемые по двух-, трех- и четырехпроводной конфигурации (табл. 1). Также RTD изготавливают из никеля и меди.

Самый распространенный тип RTD — Pt100, выпускается в двух вариантах: проволочном и тонкопленочном. Каждый вариант выполняется с учетом нескольких стандартных кривых и допусков. Чаще всего используются кривые согласно стандарту DIN (Deutsches Institut für Normung, Немецкий институт по стандартизации). Стандартная кривая описывает зависимость

сопротивления от температуры для платинового датчика сопротивлением 100 Ом, стандартные допуски и диапазон рабочих температур. Все эти параметры определяют точность RTD начиная с базового сопротивления 100 Ом при температуре 0 °C. Стандарт DIN предусматривает несколько классов допусков для RTD, которые приведены в таблице 2 и применимы к платиновым RTD типа Pt1000, используемым в системах с низким энергопотреблением.

При выборе RTD-датчика нужно учитывать как особенности самого датчика, так и его точность. Диапазон температуры различается для разных материалов датчика, а точность, указанная для калибровочной температуры (обычно 0 °C), зависит от ее изменения. Таким образом, важно определить измеряемый температурный диапазон и учитывать, что любые значения ниже или выше калибровочной температуры будут характеризоваться более широкими допусками и меньшей точностью.

Датчики RTD подразделяются в зависимости от номинального сопротивления при 0 °C.

Таблица 1. Распространенные типы RTD

Тип RTD (число обозначает сопротивление при 0 °C)	Материал	Температурный диапазон, °C
Pt100, Pt1000	Платина	-200...+850
Pt200, Pt500	Платина	-200...+850
Cu10, Cu100	Медь	-100...+260
Ni120	Никель	-80...+260

Таблица 2. Точность RTD — классы А, В и 1/3 DIN

Тип датчика	Класс DIN	Допуск при 0 °C, °C	Допуск при +50 °C, °C	Допуск при +100 °C, °C
Pt100RTD (тонкопленочный)	Класс В	±0,3	±0,55	±0,8
Pt100RTD (тонкопленочный)	Класс А	±0,15	±0,25	±0,35
Pt100RTD (проволочный/тонкопленочный)	1/3 класса В	±0,1	±0,18	±0,27

Датчик Pt100 имеет температурный коэффициент порядка 0,385 Ом/°С, для датчика Pt1000 температурный коэффициент в 10 раз выше. Многие проектировщики используют данные коэффициенты, чтобы приблизительно рассчитать температуру по сопротивлению, однако уравнения Каллендара — Ван Дюзена являются более точным способом перевода из одних единиц в другие.

Уравнение для температуры $t \leq 0\text{ }^\circ\text{C}$:

$$R_{\text{RTD}}(t) = R_0[1 + At + Bt^2 + C(t - 100)t^3]. \quad (1)$$

Уравнение для температуры $t \geq 0\text{ }^\circ\text{C}$:

$$R_{\text{RTD}}(t) = R_0(1 + At + Bt^2), \quad (2)$$

где t — температура RTD, °С; $R_{\text{RTD}}(t)$ — сопротивление RTD при температуре t ; R_0 — сопротивление RTD при $0\text{ }^\circ\text{C}$ (в нашем случае $R_0 = 100\text{ Ом}$); $A = 3,9083 \times 10^{-3}$; $B = -5,775 \times 10^{-7}$; $C = -4,183 \times 10^{-12}$.

Схемы подключения RTD

Еще один параметр, который нужно учитывать при выборе RTD, — схема его подключения, которая влияет на точность системы. Существует три различные конфигурации RTD (рис. 1), причем каждая имеет определенные достоинства и недостатки и требует своего подхода к снижению погрешности измерения.

Двухпроводная конфигурация является самой простой, но и наименее точной из-за того, что сопротивления подводящих проводов и их колебания под влиянием температуры вносят существенную ошибку в измерении. Поэтому такая схема подключения используется только при очень коротких подводящих проводах или высокоом сопротивлении датчика (например, Pt1000) — оба этих условия минимизируют влияние сопротивления провода на точность измерения.

Наиболее широкое распространение получила трехпроводная схема подключения. Ее преимущество заключается в использовании трех выводов, что важно для схем, где нужно минимизировать размер разъема (требуется

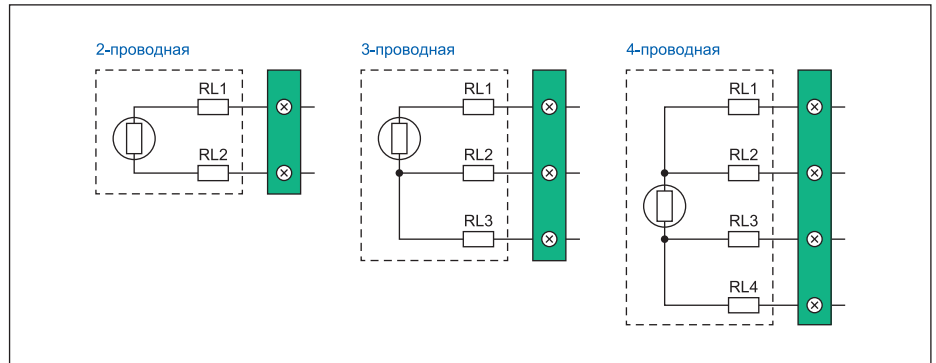


Рис. 1. Схемы подключения RTD

три контакта вместо четырех, как у четырехпроводного RTD). Трехпроводная конфигурация имеет гораздо большую точность по сравнению с двухпроводной. При подключении по трехпроводной схеме погрешность из-за сопротивления провода можно компенсировать за счет различных методов калибровки, которые будут рассмотрены далее.

Четырехпроводная схема подключения самая дорогая, но и самая точная. Такая конфигурация полностью исключает ошибки, связанные с сопротивлением подводящих проводов и влиянием изменения температуры. Соответственно, четырехпроводная схема демонстрирует наилучшее качество измерения.

Конфигурация электрической схемы RTD

Для того чтобы обеспечить максимально точные измерения с помощью RTD-датчиков, требуется поддерживать точность на каждом этапе обработки сигнала: при предварительной обработке, аналого-цифровом преобразовании, линейризации и калибровке. Типовая схема измерительной системы на основе RTD состоит из нескольких ступеней, которые изображены на рис. 2. Несмотря на то что сигнальная цепочка выглядит достаточно простой, в данной схеме есть ряд нетривиальных моментов, и при проектировании системы

необходимо учитывать выбор сложных компонентов, схему соединения, анализ ошибок и другие проблемы обработки аналогового сигнала, которые оказывают влияние на общий размер печатной платы и на стоимость материалов ввиду увеличения числа функциональных блоков. Но есть и положительный момент — компания Analog Devices предлагает целую линейку интегрированных системных решений, которые позволяют упростить разрабатываемые схемы, уменьшить размер печатной платы, сократить время выхода на рынок и снизить общую стоимость измерительных систем на основе RTD.

Для трех конфигураций RTD применяются различные схемы подсоединения датчика к АЦП и другим внешним компонентам, включая источник тока возбуждения и гибко настраиваемый мультиплексор. В данном разделе подробно описаны и проанализированы схемные решения для каждой конфигурации RTD.

ΣΔ-АЦП

Использование ΣΔ-АЦП дает множество преимуществ при проектировании систем на основе RTD. Во-первых, благодаря избыточной частоте дискретизации входного аналогового сигнала минимизируется потребность во внешней фильтрации — хватит простого RC-фильтра. Также ΣΔ-АЦП обеспечивают широкие возможности при выборе типа

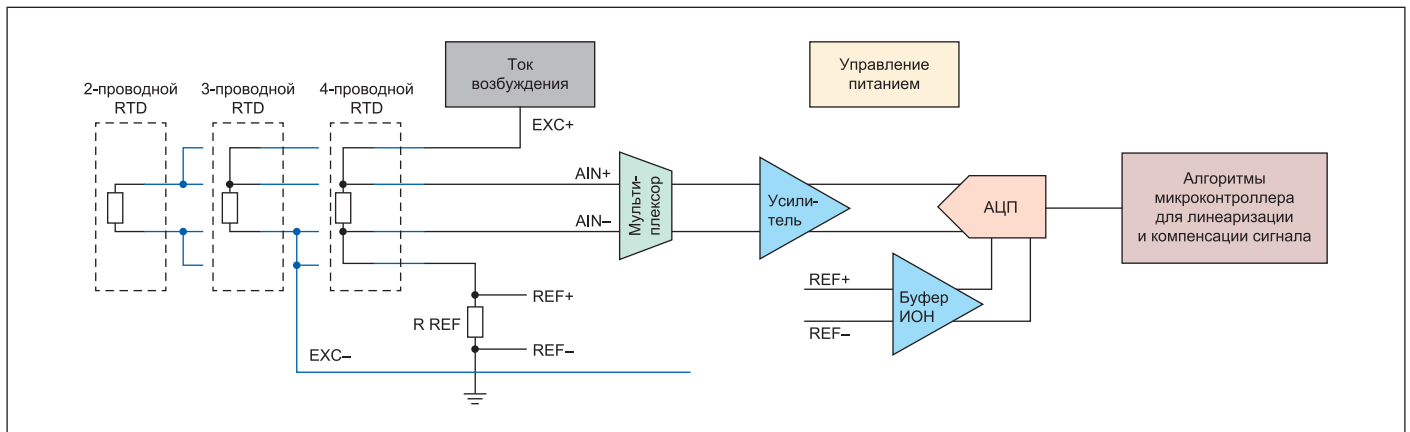


Рис. 2. Типовая схема для измерения сигнала RTD

фильтра и скорости обновления выходных данных. Встроенный цифровой фильтр позволяет устранять любые помехи от основной сети, к которой подключена схема. У 24-разрядных АЦП, таких как AD7124-4/AD7124-8, максимальная разрешающая способность (peak-to-peak) достигает 21,7 бит. К их преимуществам также относятся:

- широкий диапазон синфазных напряжений для аналоговых входных сигналов;
- широкий диапазон синфазных напряжений для опорных входных сигналов;
- возможность поддержки логометрических конфигураций;
- буферизация опорного и аналогового входных сигналов.

Некоторые $\Sigma\Delta$ -АЦП с высокой степенью интеграции содержат:

- усилитель с программируемым коэффициентом усиления (programmable gain amplifier, PGA);
- источник тока возбуждения;
- буферы опорного/аналогового входных сигналов;
- функции калибровки.

Все эти составляющие значительно упрощают процесс проектирования RTD, сокращают материальные затраты, общую стоимость системы, требуемое место на печатной плате и время разработки.

В статье в качестве преобразователя используются микросхемы AD7124-4/AD7124-8 — прецизионные АЦП с низким шумом и низким энергопотреблением, со встроенными PGA-усилителем, источником тока и буферами аналогового и опорного входных сигналов.

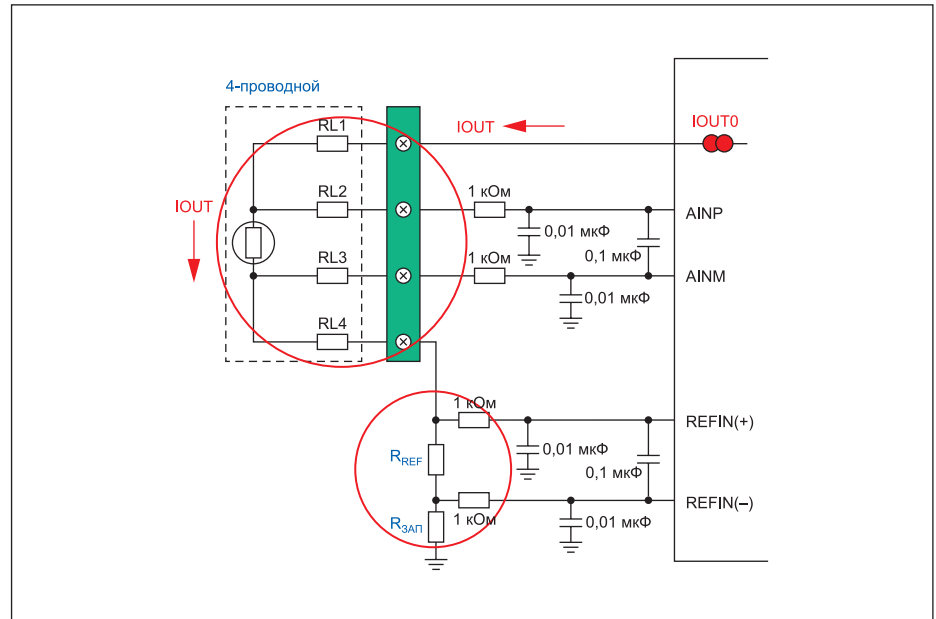


Рис. 3. Логометрическая схема измерения для четырехпроводного RTD

Логометрические измерения

Логометрическая конфигурация представляет собой эффективное и экономичное решение для систем на основе резистивных датчиков, таких как RTD или термисторы. В рамках логометрического подхода предполагается, что опорное напряжение и напряжение, подаваемое на датчик, должны иметь единый источник. В таком случае сам источник возбуждения не обязан быть точным. На рис. 3 представлен пример логометрической конфигурации для четырехпроводного

RTD. Постоянный ток возбуждения поступает на RTD и на прецизионный резистор R_{REF} , при этом в качестве опорного используется напряжение, которое возникает в резисторе R_{REF} . При данной конфигурации изменение тока возбуждения никак не влияет на точность измерения. Таким образом, логометрический подход предусматривает применение менее стабильного тока возбуждения с большим содержанием шума. Предпочтительнее использовать источник тока, а не напряжение возбуждения, поскольку ток менее подвержен воздействию шума. Основные факторы, которые нужно учесть при выборе номинала источника возбуждения, обсудим в следующем разделе статьи.

Объединенные выводы IOUT/AIN

Часто $\Sigma\Delta$ -АЦП используются совместно с интегрированными мультиплексорами и источниками тока возбуждения, чтобы обеспечить многоканальное измерение параметров и удобное подведение тока к каждому датчику. В таких АЦП, как AD7124, применяется один вывод одновременно как выход тока возбуждения и как аналоговый вход (рис. 4). В результате объединения выводов IOUT и AIN на один трехпроводной RTD-датчик приходится всего два вывода, что увеличивает количество каналов. Однако в данной конфигурации высокий номинал резистора R при фильтрации низкочастотных и электромагнитных помех может привести к увеличению погрешности сопротивления датчика, поскольку R последовательно соединен с RTD — это означает, что для использования подходит ограниченный диапазон сопротивлений R . Поэтому во избежание возможных ошибок измерения обычно рекомендуется иметь отдельный вывод для каждого источника тока.

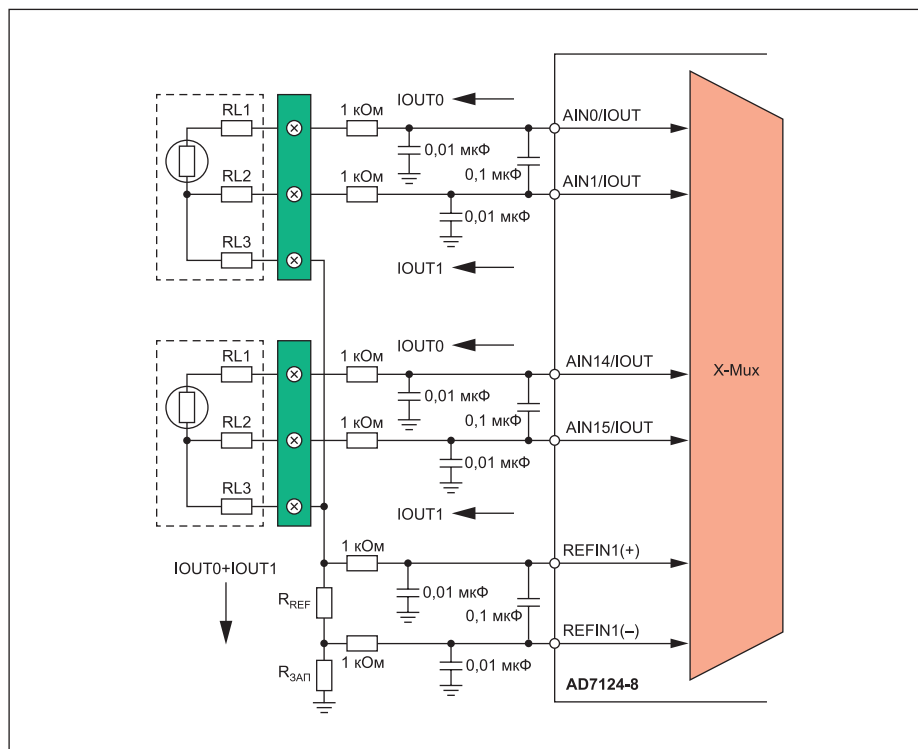


Рис. 4. Трехпроводной RTD с объединенными выводами IOUT/AIN

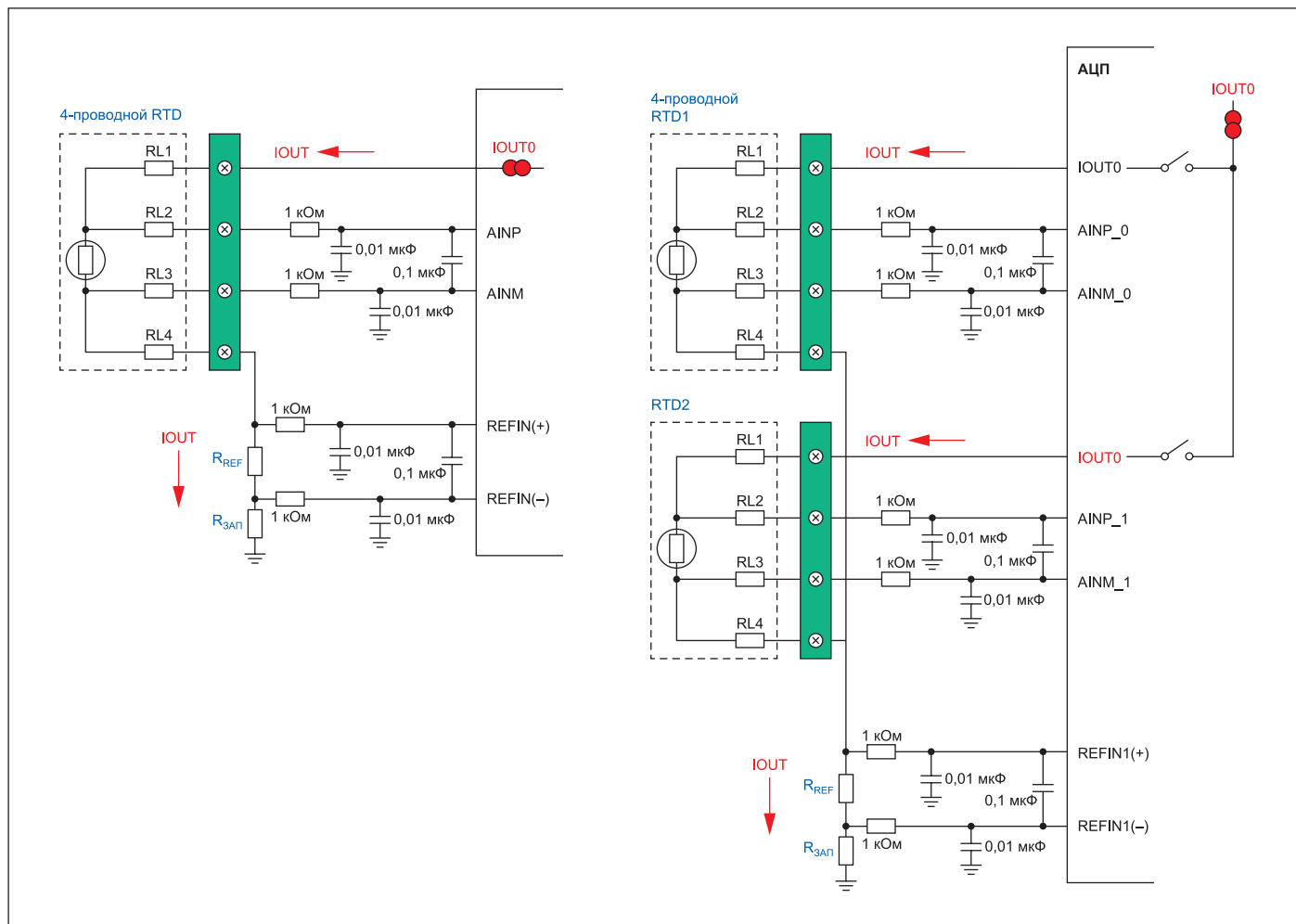


Рис. 5. Конфигурация аналогового входа измерительной системы с одним и несколькими четырехпроводными RTD

Схема подключения четырехпроводной RTD

Четырехпроводная конфигурация RTD обеспечивает наивысшую точность измерений. Единственная проблема, с которой сталкиваются проектировщики систем, заключается в высокой стоимости самого датчика и большом размере четырехконтактного разъема по сравнению с двумя другими конфигурациями. В данной схеме подключения ошибки, связанные с сопротивлением подводящих проводов, исключаются за счет использования обратных проводов. В четырехпроводной конфигурации применяется метод Кельвина, когда два провода предназначены для подачи тока возбуждения, а два других служат для снятия напряжения на самом RTD-датчике. Как показано на рис. 5, при такой схеме подключения требуется только один источник тока возбуждения IOUT. При этом у АЦП три аналоговых вывода: один для тока возбуждения, IOUT, и два выступают в качестве полностью дифференциального входного канала (AINP и AINM), который используется для измерения напряжения на датчике.

Когда схема содержит несколько четырехпроводных RTD, достаточно одного

источника возбуждения, ток от которого подводится к каждому датчику. Если расположить опорный резистор в цепи нижнего плеча RTD, то одного резистора хватит для обеспечения всех измерений — то есть опорный резистор будет общим для всех датчиков. Обратите внимание, что если опорный вход АЦП имеет широкий диапазон синфазного сигнала, то опорный резистор можно добавить как в цепь нижнего, так и в цепь верхнего плеча. Для схем с одним четырехпроводным RTD подойдет любое из двух положений резистора. Однако если в системе имеется несколько четырехпроводных датчиков, целесообразнее разместить опорный резистор в цепи нижнего плеча, поскольку тогда он может совместно использоваться всеми RTD. Также следует учесть, что у некоторых АЦП есть буферы опорного сигнала. Они могут требовать определенного запаса по напряжению, поэтому, если буфер включен, в схему нужно добавить резистор, обеспечивающий данный запас. Включение буфера позволяет устанавливать на входе опорного сигнала более надежные фильтры без риска спровоцировать ошибки, в частности ошибку усиления АЦП.

Схема подключения двухпроводного RTD

Двухпроводная конфигурация RTD, показанная на рис. 6, представляет собой самый простой вариант подключения. В нем также требуется только один источник тока возбуждения, а у АЦП имеется три аналоговых вывода: один для тока возбуждения, IOUT, и два в качестве полностью дифференциального входного канала (AINP и AINM), которые используются для измерения напряжения на датчике. Когда схема содержит несколько двухпроводных RTD, достаточно одного источника возбуждения, ток от которого подводится к каждому датчику. Если расположить опорный резистор в цепи нижнего плеча RTD, как в случае с четырехпроводной конфигурацией, то одного резистора хватит для обеспечения всех измерений — то есть опорный резистор будет общим для всех датчиков.

Двухпроводная конфигурация является наименее точной из всех трех схем подключения, так как сопротивление в точке измерения включает сопротивление датчика и сопротивления подводящих проводов RL1 и RL2, что приводит к завышению измеренных значений напряжения на АЦП. В системах с дистанционными датчиками и очень большой длиной

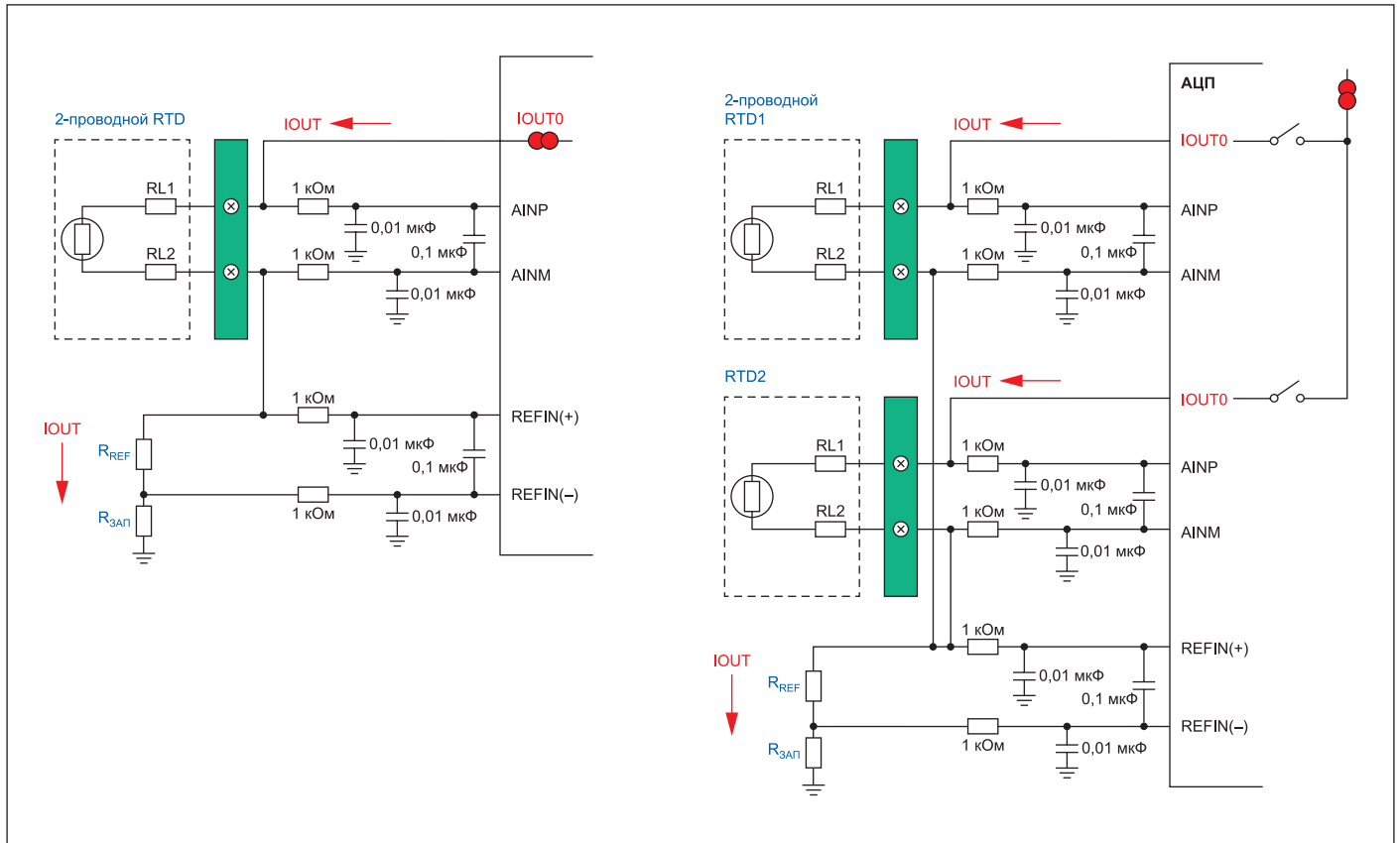


Рис. 6. Конфигурация аналогового входа измерительной системы с одним и несколькими двухпроводными RTD

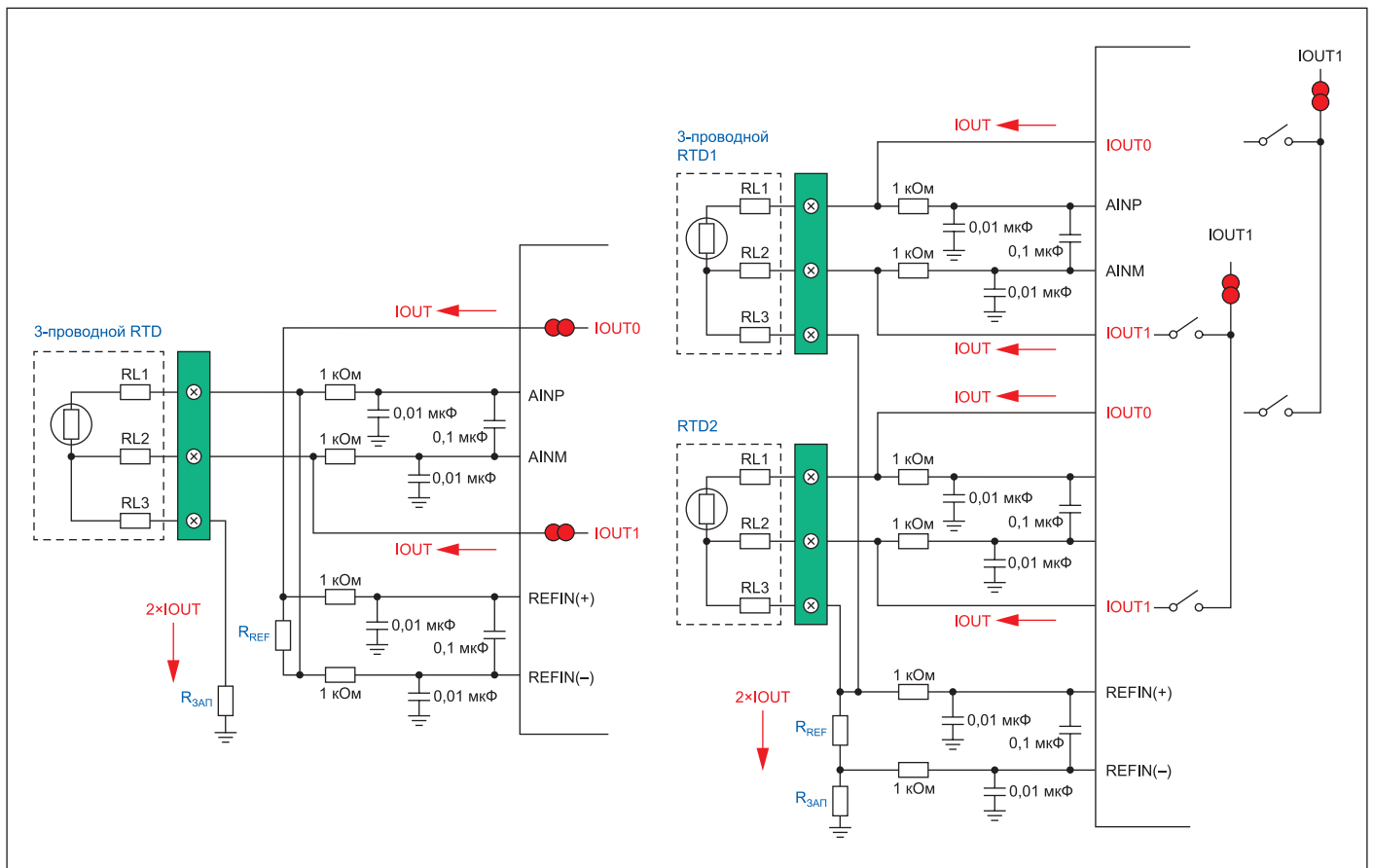


Рис. 7. Конфигурация аналогового входа измерительной системы с одним и несколькими трехпроводными RTD

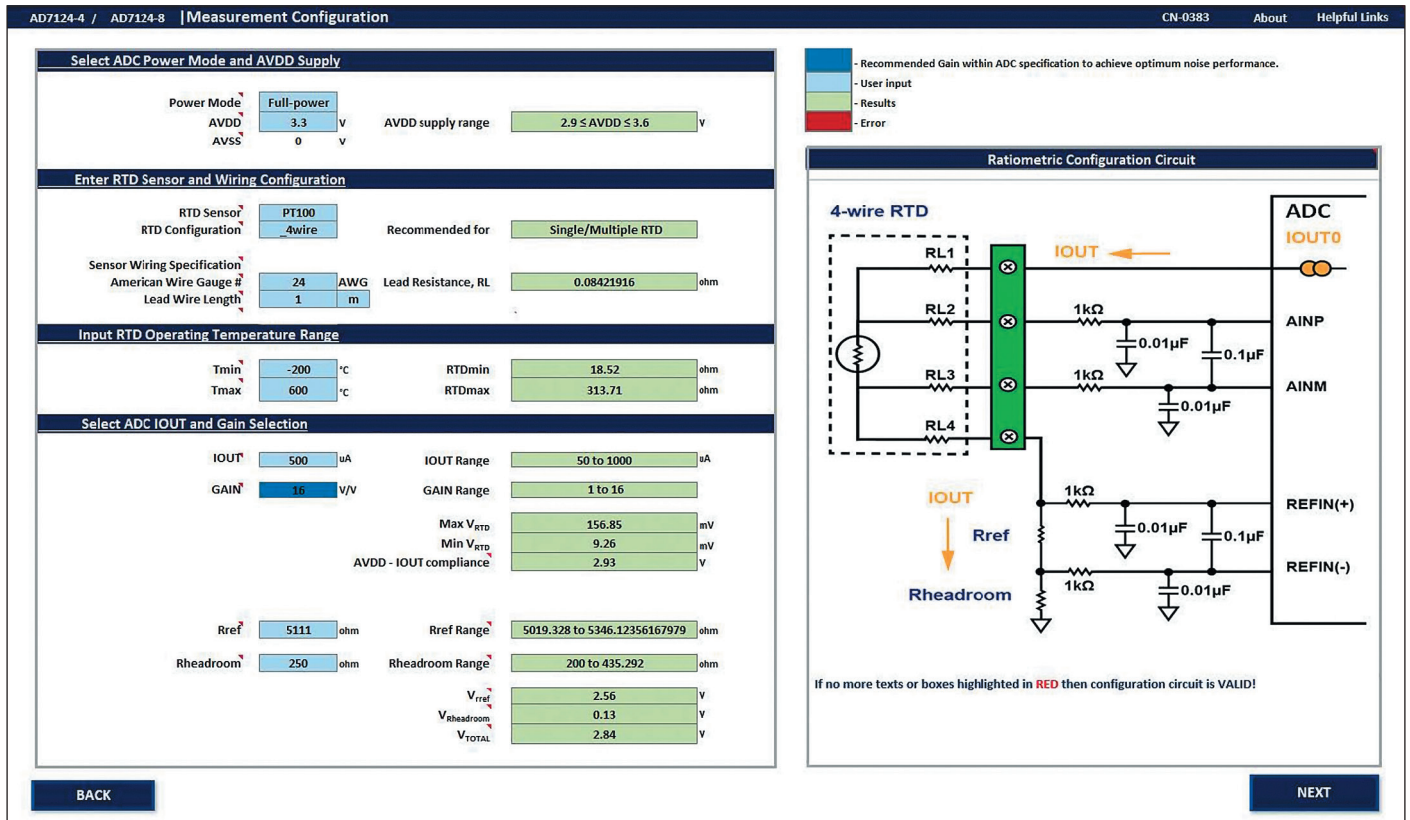


Рис. 8. Конфигуратор RTD

проводов ошибки могут быть весьма существенны. Например, эквивалентное сопротивление медного провода 24 AWG длиной 7,62 м составит $0,085 \times 2 \times 7,62 \approx 1,3$ Ом. Такое сопротивление проводов приводит к ошибке измерения примерно $1,3/0,385 \approx 3,38$ °C, при этом сопротивление проводов само зависит от температуры, что еще больше увеличивает погрешность.

Схема подключения трехпроводного RTD

Существенно сократить ошибки, присущие двухпроводной конфигурации RTD, можно за счет применения трехпроводной схемы подключения датчика. В рамках данной статьи для устранения погрешностей, вызванных сопротивлением подводящих проводов RL1 и RL2, используется второй источник тока возбуждения (показан на рис. 7). Таким образом, в трехпроводной конфигурации RTD у АЦП четыре аналоговых вывода: два для тока возбуждения (IOUT0 и IOUT1) и два в качестве полностью дифференциального входного канала (AINP и AINM), предназначенного для измерения напряжения на датчике.

Существует два способа подключения трехпроводного RTD. Первый способ предполагает ввод опорного резистора в цепь верхнего плеча так, чтобы ток возбуждения от первого источника IOUT0 проходил через R_{REF}, RL1 и затем поступал в RTD, а ток от второго источника проходил через про-

вод RL2 и формировал напряжение, которое скомпенсирует падение напряжения на проводе RL1. Так, хорошо согласованные источники тока полностью устраняют ошибку, вызванную сопротивлением подводящих проводов. В случае несогласованности источников подобная конфигурация минимизирует ее влияние на результат измерений. Поскольку один и тот же ток проходит через RTD и R_{REF}, то любая несогласованность двух источников тока влияет только на расчет сопротивлений подводящих проводов. Данная конфигурация применяется для схем с одним RTD.

При использовании нескольких трехпроводных RTD рекомендуется располагать опорный резистор в цепи нижнего плеча (способ 2), так как это позволяет снизить общую стоимость за счет использования одного опорного резистора для всех датчиков. Однако в такой конфигурации через каждый датчик проходит ток только от одного источника, а через опорный резистор проходит ток от обоих. Получается, что любая несогласованность источников возбуждения может повлиять на значение опорного напряжения и на компенсацию сопротивления соединительных проводов. При рассогласованных источниках тока такая конфигурация будет иметь большую погрешность измерения, чем первая. Существует два метода калибровки, которые позволяют справиться с рассогласованием источников тока и связанным с этим дрейфом, повышая таким образом точность второй конфигурации. Первый из них заклю-

чается в стабилизации прерыванием (изменении полярности подключения), снятии измерений для каждой фазы и затем вычислении их среднего значения. Второй метод предполагает непосредственное измерение значений токов возбуждения и использование рассчитанного рассогласования для компенсации в микроконтроллере. Более подробно методы калибровки рассматриваются в обзоре измерительной системы CN-0383 [3].

Оптимизация системы на основе RTD

С точки зрения проектирования существует ряд проблем, связанных с разработкой и оптимизацией систем на основе RTD. Первая проблема, уже описанная выше, заключается в выборе датчиков и схемы их подключения. Еще одна сложность связана с конфигурацией измерительной системы и предусматривает настройку АЦП, выбор источника тока, коэффициента усиления и номиналов внешних компонентов с учетом обеспечения оптимального функционирования системы и соблюдения технических требований для АЦП. Наконец, самая главная проблема заключается в достижении заданной точности измерений и определении источников ошибок, из которых складывается общая погрешность системы.

Новый конфигуратор и калькулятор суммарной погрешности RTD [4] представляет собой прикладное решение для проектиро-

вания и оптимизации измерительных систем на основе RTD на всех этапах от идеи до разработки промышленного образца. Данный инструмент (рис. 8):

- позволяет выбрать наилучшую конфигурацию системы и схему подключения датчиков;
- помогает определить различные источники ошибок и оптимизировать схему.

Данный инструмент разработан для систем, использующих AD7124-4/AD7124-8. Он предоставляет пользователям возможность настраивать ток возбуждения, коэффициент усиления и выбирать внешние компоненты. В ПО встроена функция индикации параметров, выходящих за рамки спецификации, поэтому можно быть уверенным, что устройство удовлетворяет всем техническим требованиям АЦП.

Выбор значений тока возбуждения, коэффициента усиления и внешних компонентов

В идеале мы стремимся выбрать как можно большие значения тока, чтобы получить более высокое выходное напряжение и максимизировать входной диапазон АЦП. Однако датчик обладает сопротивлением, и необходимо проконтролировать, чтобы рассеиваемая мощность и эффект самонагрева, обусловленный большими значениями тока, не повлияли на результаты измерений. Проектировщик системы может выбрать большое значение тока возбуждения, но для минимизации самонагрева в перерывах между измерениями ток придется отключать, так что нужно еще учесть необходимость временной синхронизации компонентов. В качестве альтернативы можно выбрать меньшее значение тока, которое минимизирует самонагрев и решит проблему синхронизации, но здесь важно оценить, как это повлияет на показатели работы системы. Все эти сценарии можно протестировать с помощью конфигуратора и калькулятора суммарной погрешности RTD [4]. Данный инструмент позволяет пользователю найти баланс между значением тока возбуждения и коэффициентом усиления, выбрать номинал внешних компонентов для оптимизации напряжения аналогового входа в соответствии с настройкой коэффициента усиления и скорости АЦП, благодаря чему можно добиться увеличения разрешения и производительности системы при более низком уровне шума и меньшей ошибке смещения.

Для того чтобы более подробно ознакомиться с частотной характеристикой фильтра или временными показателями преобразования, можно воспользоваться онлайн-инструментом Virtual Eval [5].

Как на измерительном, так и на опорных входах $\Sigma\Delta$ -АЦП осуществляется непрерывная дискретизация сигнала за счет входного интерфейса переключаемого конденсато-

ра. Для рассматриваемых систем на основе RTD сигнал опорного входа также зависит от внешнего опорного резистора. Для борьбы с наложением спектров (алайзингом) на аналоговом входе $\Sigma\Delta$ -АЦП рекомендуется использовать внешний RC-фильтр. Для подавления электромагнитных помех проектировщик системы может установить высокие значения R и C как для аналогового, так и для опорного входа. Однако большие значения RC могут привести к ошибкам усиления, поскольку входной интерфейс схемы не будет успевать установиться между моментами дискретизации. Буферизация аналогового и опорного входных сигналов предотвращает возникновение этих ошибок и снимает ограничения с допустимых значений R и C.

В микросхемах AD7124-4/AD7124-8 при использовании внутреннего коэффициента усиления больше единицы буферы аналогового входа включаются автоматически, и так как PGA-усилитель располагается перед входным буфером и имеет выход rail-to-rail, то и аналоговый вход будет того же типа. При использовании буферов опорного сигнала или АЦП с единичным коэффициентом усиления и включенными буферами аналогового входа важно убедиться, что в схеме обеспечивается требуемый запас по напряжению.

Датчик Pt100 генерирует сигнал низкого уровня, порядка сотен милливольт. В данном случае оптимален АЦП с широким динамическим диапазоном. Как вариант можно использовать дополнительный каскад для усиления сигнала перед его подачей в АЦП. Микросхемы AD7124-4 и AD7124-8 поддерживают коэффициент усиления 1–128, позволяя оптимизировать схему для широкого диапазона тока возбуждения. Многообразие доступных вариантов усиления помогает найти баланс между значениями тока возбуждения, коэффициентом усиления, внешними компонентами и рабочими характеристиками системы. Конфигуратор RTD показывает, можно ли использовать те или иные значения тока с выбранным RTD-датчиком, а также предлагает подходящие номиналы для прецизионного опорного резистора и опорного резистора, обеспечивающего запас по напряжению. Помимо этого, данный инструмент контролирует соблюдение технических требований АЦП и отображает возможные варианты коэффициента усиления, поддерживаемые конкретной конфигурацией. Так, в AD7124 источник тока должен удовлетворять условию совместности по выходу (output compliance), то есть вывод источника должен иметь некоторый запас по сравнению с напряжением AVDD. Данный инструмент позволяет контролировать выполнение этого требования.

Таким образом, конфигуратор RTD [4] помогает разработчикам спроектировать систему, удовлетворяющую эксплуатационным ограничениям АЦП и RTD-датчиков.

Точность номиналов внешних компонентов, таких как опорный резистор, и их вклад в системную ошибку будут рассмотрены далее.

Варианты фильтрации (подавление частот 50 и 60 Гц с помощью аналоговых и цифровых фильтров)

Как уже обсуждалось выше, для $\Sigma\Delta$ -преобразователей рекомендуется использовать антиалайзинговый фильтр. Так как встроенный фильтр АЦП является цифровым, его частотная характеристика отражается вблизи частоты дискретизации. Антиалайзинговая фильтрация необходима для ослабления помех на частоте модулятора, а также на любых кратных ей частотах. Благодаря передискретизации аналогового сигнала в $\Sigma\Delta$ -преобразователях конструкция антиалайзингового фильтра значительно упрощается и достаточно простого однополюсного RC-фильтра.

В ходе промышленной эксплуатации готовой системы борьба с шумом и помехами от окружающей среды может представлять достаточно серьезную проблему, особенно в таких областях применения, как промышленная автоматика, приборостроение, управление технологическими процессами и управление энергоснабжением, где одновременно требуются устойчивость к шуму и низкий уровень шумового воздействия на соседние компоненты. Шум, импульсные и прочие помехи могут влиять на точность и разрешающую способность системы. Также помехи могут возникать, когда система получает питание от сети. В Европе в сети возникают гармоники, кратные 50 Гц, в США — кратные 60 Гц. Поэтому при разработке систем на основе RTD следует учесть необходимость установки фильтрующего контура для подавления частот 50/60 Гц, причем многие проектировщики стремятся разработать универсальные системы с одновременным подавлением помех на обеих частотах.

Большинство АЦП с узкой полосой пропускания, включая AD7124-4 и AD7124-8, предлагает различные варианты цифровой фильтрации, которые можно запрограммировать на подавление частот 50/60 Гц. Выбранный вариант фильтрации оказывает влияние на скорость обновления выходных данных, время установления и подавление указанных частот. Если используется несколько каналов, то после каждого переключения фильтру требуется определенное время, чтобы установиться и выполнить преобразование, — таким образом, выбор фильтра с более продолжительным временем установления (например, sinc4 или sinc3) снижает общую пропускную способность системы. В таком случае целесообразно использовать выходной постфильтр или КИХ-фильтр с меньшим временем установления, чтобы обеспечить одновременное подавление частот 50/60 Гц и увеличить пропускную способность.



Рис. 9. Калькулятор источников ошибок RTD

Оценка энергопотребления

Потребление электроэнергии и баланс мощности системы в значительной степени зависят от области ее применения. Микросхемы AD7124-4/AD7124-8 имеют три режима энергопотребления, которые позволяют найти компромисс между точностью, скоростью и энергопотреблением системы. Для портативных и удаленно устанавливаемых устройств необходимо применять компоненты и конфигурации с низким энергопотреблением.

В таких случаях можно использовать режимы низкого и среднего энергопотребления — скорость будет существенно ниже, но характеристики АЦП остаются на высоком уровне. В то же время в системах управления технологическими процессами, которые работают от сети, допускается гораздо большее потребление тока, поэтому можно использовать режим работы на полной мощности, что позволяет повысить скорость обновления выходных данных и производительность системы.

Источники ошибок и варианты калибровки

Когда конфигурация системы уже известна, следующий шаг заключается в оценке погрешностей АЦП и системных ошибок. Так, проектировщики системы могут оценить, удовлетворяет ли конфигурация входного интерфейса и АЦП целевым значениям точности и производительности. Конфигуратор и калькулятор суммарной погрешности RTD [4] дает пользователю возможность изменять конфигурацию системы для достижения оп-

тимальных рабочих показателей. В качестве примера на рис. 9 представлен сводный отчет об ошибках системы. На круговой диаграмме системных погрешностей видно, что наибольшая доля ошибок связана с начальной точностью опорного резистора и его температурным коэффициентом. Следовательно, целесообразно рассмотреть вариант применения внешнего опорного резистора с более высокой точностью и более низким температурным коэффициентом.

Погрешность, связанная с работой АЦП, вносит не столь большой вклад в общую системную ошибку. Однако ее можно еще уменьшить за счет использования внутренних механизмов калибровки, доступных в AD7124-4 и AD7124-8. Рекомендуется запускать внутреннюю калибровку при включении электропитания и инициализации ПО, чтобы исключить ошибки усиления и смещения АЦП. Обратите внимание, что подобная калибровка не избавит от ошибок, связанных с внешним контуром. АЦП также поддерживает возможность системной калибровки, которая позволяет минимизировать ошибки смещения и усиления для всей системы в целом, но это сопряжено с дополнительными затратами и для большинства областей применения попросту не требуется.

Обнаружение неисправностей

Наличие диагностических функций становится обязательным требованием, предъявляемым к оборудованию, если оно эксплуатируется в неблагоприятных условиях и если особое внимание уделяется безопасности.

Встроенная система диагностики в микросхемах AD7124-4/AD7124-8 позволяет снизить потребность во внешних компонентах для выявления неполадок, что делает конечный продукт более компактным, простым и относительно недорогим. Система диагностики включает:

- проверку уровня напряжения на аналоговых выводах для контроля работы в допустимых диапазонах;
- проверку работы шины SPI с использованием контрольной суммы (CRC);
- проверку памяти с использованием контрольной суммы;
- проверку сигнальной цепочки.

Такое выявление неполадок делает решение более надежным. Анализ видов, последствий и диагностики отказов (failuremodes, effects, and diagnostic analysis, FMEDA) стандартного прибора на основе трехпроводного RTD показал, что значение доли безопасных отказов (safe failure fraction, SFF) превышает 90% в соответствии с IEC 61508.

Оценка системы на основе RTD

На рис. 10 показаны данные измерений из документа CN-0383. Результаты измерений получены на оценочной плате AD7124-4/AD7124-8, которая содержит демонстрационные версии двух-, трех- и четырехпроводного RTD, и пересчитаны в соответствующие значения градусов по Цельсию.

По графикам видно, что ошибка двухпроводного RTD близка к нижней допустимой границе, тогда как трех- и четырехпроводной

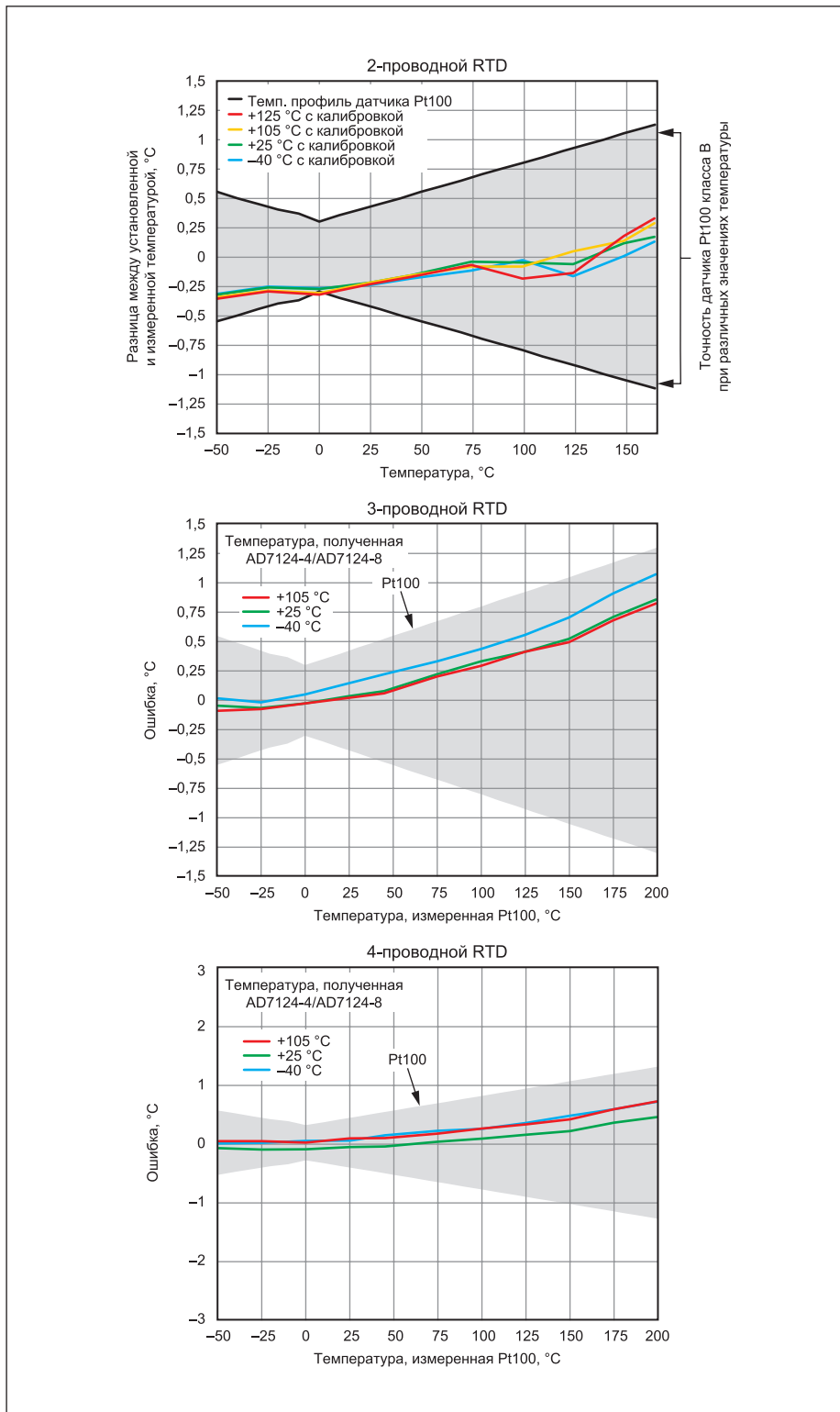


Рис. 10. Точность измерения температуры для двух-, трех- и четырехпроводного RTD при использовании выходного фильтра, низком энергопотреблении и скорости обновления выходных данных 25 SPS

датчики демонстрируют ошибку, которая не выходит за рамки разрешенных значений. Более высокая погрешность двухпроводной схемы измерения объясняется сопротивлением подводящих проводов и уже описывалась ранее.

Приведенные примеры показывают, что, следуя предложенным выше рекомендациям,

можно добиться большей точности и производительности системы, если использовать RTD-датчики совместно с узкополосными $\Sigma\Delta$ -АЦП производства Analog Devices, такими как AD7124-4 и AD7124-8. Документ CN-0383 также может служить в качестве справочного материала для быстрого перехода к прототипированию системы.

Отладочная плата позволяет пользователю оценить работу системы и в ознакомительном режиме протестировать каждую конфигурацию. Кроме того, разработку прошивки для различных конфигураций RTD можно упростить за счет применения примеров кода, доступных на страницах с описанием микросхем AD7124-4 и AD7124-8.

Микросхемы АЦП AD7124-4/AD7124-8 с $\Sigma\Delta$ -архитектурой хорошо подходят для измерений с помощью RTD, поскольку они решают такие проблемы, как подавление частот 50/60 Гц, имеют широкий синфазный диапазон аналогового и опорного входных сигналов. Также они имеют высокую степень интеграции и содержат все функции, необходимые для разработки измерительных систем на основе RTD. К тому же они обладают расширенным функционалом, который включает возможности калибровки и встроенной диагностики неполадок. Такой уровень интеграции позволяет упростить проектирование системы, снизить затраты и ускорить переход от концепции к созданию опытного образца.

Такие средства, как конфигуратор и калькулятор суммарной погрешности RTD [4], онлайн-инструмент Virtual Eval [5], аппаратно-программное обеспечение оценочных плат и документация CN-0383, могут помочь проектировщикам решить проблемы соединения различных компонентов и рассчитать суммарную погрешность схемы, а пользователям — перейти на новый уровень взаимодействия с системой.

Заключение

В статье показано, что разработка системы измерения температуры на основе RTD-датчиков — это сложный и многоэтапный процесс. Он требует от проектировщиков принятия решений о различных конфигурациях датчиков, выборе АЦП, оптимизации и оценке влияния всех этих факторов на производительность системы. Разработанные компанией Analog Devices средства, такие как конфигуратор и калькулятор суммарной погрешности RTD [4], онлайн-инструмент Virtual Eval [5], аппаратно-программное обеспечение оценочных плат и пример разработки CN-0383, упрощают этот процесс, решая проблемы соединения различных компонентов и суммарной погрешности схемы.

Литература

1. www.analog.com/ru/products/ad7124-4.html
2. www.analog.com/ru/products/ad7124-8.html
3. www.analog.com/en/design-center/reference-designs/circuits-from-the-lab/CN0383.html
4. www.analog.com/media/en/designtools/calculators/rtd_configurator_and_error_budget_calculator-rel1.0.0.exe
5. www.beta-tools.analog.com/virtualeval/