

# Беспроводные прецизионные датчики температуры с автономным питанием для промышленных сетей

Технология «Интернет вещей» (Internet of Things, IoT) отвечает набирающей силу тенденции к созданию относительно простых соединенных между собой устройств, которые обмениваются данными независимо от компьютеров и человеческого вмешательства. Эта технология позволяет повысить эффективность, безопасность и создать абсолютно новые бизнес-модели практически для всех аспектов повседневной деятельности или промышленности. Например, с ее помощью можно осуществлять эффективный и надежный мониторинг промышленных предприятий, управляя всем оборудованием с помощью большого числа датчиков. Сеть IoT, в которой устройства самостоятельно взаимодействуют друг с другом, упрощает передачу информации, позволяет увеличивать число датчиков и охват производственных площадей связью.

Крис ЛОКЕР (Kris LOKERE)

Благодаря исключению всех требований, которые предъявляются к кабельной разводке, достигается экспоненциальный рост числа надежных в эксплуатации беспроводных датчиков с очень малым энергопотреблением, функционирующих многие годы, получая питание от небольших батарей. Кроме того, в подобных сетях нет необходимости заменять или перезаряжать батареи: датчики собирают энергию из окружающей среды, поступающую в виде света, вибраций или за счет разности температур.

В статье рассматриваются способы построения высокоточного датчика температуры, действующего на энергии света, если ее достаточно, в противном случае — от небольшой батареи. Датчик также осна-

щен маломощным радиомодулем, который автоматически создает надежную ячеистую сеть для беспроводной связи датчиков с центральной точкой доступа.

## Схемное решение

На рис. 1 представлена структурная схема беспроводного датчика температуры с автономным питанием. Принцип его работы основан на использовании термистора, который питается от малошумящего источника опорного напряжения (ИОН) LT6654. 24-разрядный  $\Delta\Sigma$ -АЦП LTC2484 считывает напряжение термистора и передает результат через интерфейс SPI. Радиомодуль LTP5901 выполняет ряд следующих задач: автоматически

формирует ячеистую сеть на основе протокола IP, а встроенный микропроцессор считывает данные из АЦП LTC2484 через порт SPI и управляет последовательностью включения питания компонентов в цепи сигнала. Датчик получает питание от устройства сбора энергии, которое использует батарею или солнечную панель.

ИС LTC3330 представляет собой мало мощный двоярный импульсный источник питания, преобразующий энергию (при ее наличии) от солнечной панели и переключающийся на резервное питание от батареи, если необходимо поддержать требуемое выходное напряжение. В составе LTC3330 предусмотрен также LDO-стабилизатор, который управляет периодическим включением датчика температуры.

Вся схема реализована в виде демонстрационной платы DC2126A. Полное решение, в том числе батарея, солнечная панель и контроллер беспроводной сети, помещается в небольшом пластиковом корпусе площадью менее 115 см<sup>3</sup> (рис. 2). Для работы системы не требуются внешние кабели или соединительные узлы — достаточно установить ее в нужном месте.

## Цепь прохождения сигнала

На рис. 3 представлена сигнальная цепь с результатами измерения температуры. В составе имеются термистор и АЦП (с ИОН LT6654). Поскольку синфазное входное напряжение остается центрированным, этот

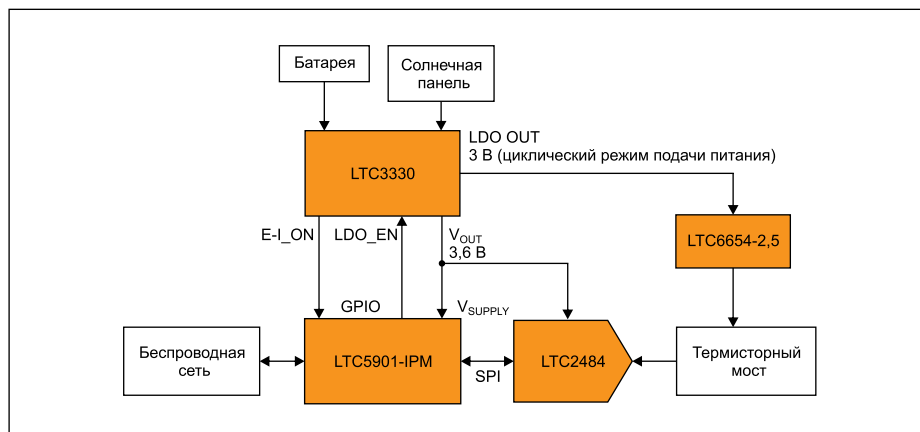


Рис. 1. Структурная схема беспроводного датчика температуры с автономным питанием



Рис. 2. ИС LTC3330: а) передняя часть платы, на которой находится сигнальная цепь, а также цепи питания, управления и беспроводной модуль; б) батарея на задней части платы; в) полное решение в корпусе с установленной солнечной панелью

преобразователь из семейства Easy Drive не потребляет входного тока, что упрощает логометрическое измерение и повышает его точность.

**Термистор**

Термистор измеряет температуру в широком диапазоне. По сути, термистор — это резистор с большим отрицательным температурным коэффициентом. Например, у термистора KS502J2 компании US Sensor сопротивление составляет 5 кОм при +25 °С. В диапазоне температуры -30...+70 °С сопротивление термистора изменяется с 88 кОм до 875 Ом.

**АЦП и высокоточный ИОН**

Термистор последовательно включен с двумя прецизионными резисторами по 49,9 кОм и питается от высокоточного источника опорного напряжения (рис. 3). ΔΣ-АЦП LTC2484 измеряет напряжение на резисторном делителе с разрешением 24 бита. Общая нескорректированная ошибка АЦП составляет 15 ppm, что для диапазона изменения сопротивления этого термистора соответствует неопределенности измерения температуры менее 0,05 °С. Поскольку в спецификации термистора указана точность 0,1 °С, температуру можно измерять без калибровки.

Шум АЦП не превышает величины 4 мкВ (от пика до пика), что соответствует ошибке измерения температуры менее 0,005 °С. Таким образом, при условии выполнения калибровки данная система может применяться для высокоточного измерения температуры.

Поскольку АЦП измеряет отношение напряжения на термисторе к опорному напряжению, ИОН не обязательно должен быть прецизионным. Однако он должен быть малощумящим, чтобы флуктуации опорного напряжения при работе АЦП не исказили результаты измерения.

Структура входа АЦП LTC2484 построена с помощью технологии Easy Drive, которая во время преобразования обеспечивает практически нулевые результирующие дифференциальные токи выборки. В итоге при протекании входного тока выборки через резистивную цепь термистора не возникают ошибки измерения, и, следовательно, отпадает необходимость в использовании отдельного буферного операционного усилителя (ОУ). Блокировочные конденсаторы на высоких частотах обеспечивают тракт с малым импедансом.

**Периодичность включения питания сигнальной цепи**

Лишь небольшое число приложений требует постоянного мониторинга температуры. Если достаточно одного измерения в секунду или минуту, целесообразно минимизировать энергопотребление такой системы в периоды ее бездействия. Резисторная цепь потребляет ток до 25 мкА от источника опорного напряжения на 2,5 В. Во избежание потерь мощности между измерениями питание ИОН должно включаться только на время работы АЦП.

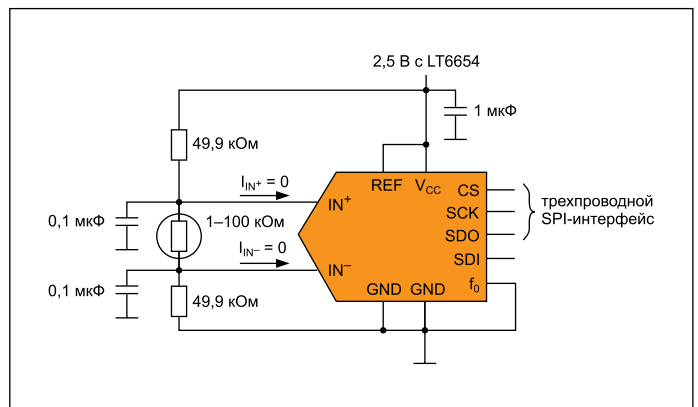


Рис. 3. 24-разрядный АЦП LTC2484 в сигнальной цепи, измеряющий напряжение термистора

**Определение продолжительности включения**

Постоянная времени RC на входе АЦП равна примерно 5 мс. Включение питания за 80 мс до проведения измерений позволяет входному напряжению АЦП полностью установиться. Поскольку оба входных узла включаются с одинаковой скоростью, выполнять точные измерения можно задолго до истечения расчетного времени установления. LT6654 питается от выходного напряжения 3 В LDO-стабилизатора, находящегося в составе LTC3330. Встроенный микропроцессор модуля LTP5901-IPM управляет разрешающим выводом LDO-стабилизатора, обеспечивая необходимый запас времени до и после моментов измерения температуры.

Закончив преобразование, АЦП LTC2484 автоматически переходит в спящий режим. Ток, потребляемый в этом режиме, составляет около 1 мкА, что гораздо меньше тока, необходимого для питания беспроводного модуля. По этой причине управление питанием АЦП не нужно. Поскольку у АЦП и LTP5901-IPM одинаковое напряжение питания, у них совпадают логические уровни интерфейса SPI.

**Поцикловое обновление результатов измерения**

Передав результат измерения через SPI-порт, АЦП LTC2484 автоматически приступает к новому преобразованию и сохраняет данные во внутреннем регистре, пока не поступит новый запрос. Такой подход упрощает работу систем, которые очень часто считывают данные о температуре. Годится он и для маломощных приложений с очень продолжительными интервалами между измерениями.

Для того чтобы обеспечить поступление новых данных в этих случаях, приложение сначала подает импульсы на выходы CS и SCK,

сбрасывая предыдущую информацию о температуре из регистра АЦП, и автоматически начинает новое преобразование. Дождавшись окончания этого преобразования, микропроцессор считывает результат через SPI-порт. Чтобы уменьшить энергопотребление, система незамедлительно приступает к отключению термисторной цепи (блокируя LDO-стабилизатор), даже несмотря на то, что АЦП автоматически приступает к следующему преобразованию. Результат этого считывания в дальнейшем сбрасывается при последующем запросе микропроцессора.

### Расчет мощности, потребляемой цепью прохождения сигнала

Суммарную мощность, которую потребляет схема датчика температуры, можно определить следующим образом:

- Сумма тока источника опорного напряжения (350 мкА), термисторной цепи (25 мкА) и АЦП (160 мкА при выполнении преобразования) дает общий ток потребления, равный 535 мкА (табл. 1).

Таблица 1. Потребление тока в цепи сигнала в активном режиме

Элементы схемы	Потребление тока, мкА
ИОН LT6654	350
Термисторная цепь	25
АЦП LTC2484	160
Всего	535

- Определим расходуемый заряд, установив время протекания этого тока. На преобразование АЦП требуется около 140 мс, а на установление опорного напряжения термисторной цепи перед началом этого преобразования — 80 мс. Добавив время на считывание регистра АЦП через SPI-интерфейс, получим время активного состояния около 300 мс. Потребление тока величиной 535 мкА в течение 300 мс соответствует протеканию заряда 160 мкКл. К этой величине добавим заряд 14 мкКл, необходимый блокировочному конденсатору емкостью 4,7 мкФ, который перезаряжается при каждом измерении с 0 до 3 В. В результате получаем, что на одно измерение температуры требуется заряд 174 мкКл.
- При измерениях с частотой 1 раз в 10 с потребляемый ток составляет 17 мкА. В таблице 2 приведены результаты расчета среднего тока при считывании показаний с другой периодичностью.

Таблица 2. Среднее потребление тока при разной частоте считывания

Частота считывания температуры	Средний потребляемый ток, мкА
Один раз в секунду	170
Один раз в 10 с	17
Один раз в мин	2,9

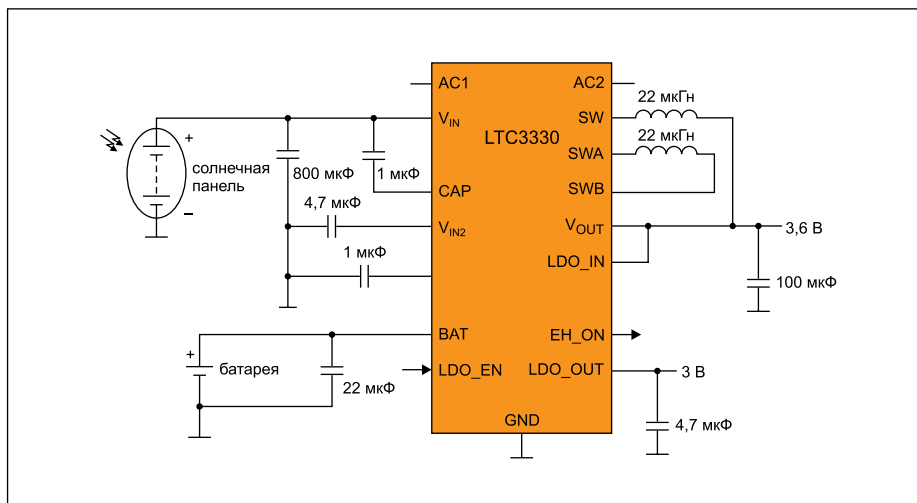


Рис. 4. Микросхема LTC3330 для управления питанием всех узлов приложения

### Универсальное решение по управлению питанием с помощью одной ИС

Микросхема LTC3330 управляет питанием всех узлов приложения (рис. 4), автоматически устанавливая приоритет между двумя источниками питания — солнечной панелью или батареей, обеспечивая регулируемое выходное напряжение. В ее составе два импульсных источника питания и линейный стабилизатор, установленные в небольшой монолитный корпус. Дополнительный LDO-выход управляется логическим входом, который используется для реализации циклического режима включения датчика температуры. LTC3330 генерирует флаг на выходе, указывающий, какой из источников питания используется в конкретный момент времени.

### Два импульсных преобразователя для управления батареей и солнечной панелью

Понижающе-повышающий преобразователь получает энергию от батареи и стабилизирует выходное напряжение на уровне 3,6 В для рассматриваемого приложения. Отдельный понижающий преобразователь может использовать энергию солнечной панели для стабилизации выходного напряжения на том же уровне. Блок присвоения приоритетов обеспечивает применение солнечной энергии при наличии такой возможности и подключает батарею только при необходимости. В других приложениях ИС LTC3330 поддерживает сбор энергии источниками переменного тока, например пьезокристаллами, которые генерируют напряжение, пропорциональное интенсивности вибраций.

Поскольку в режиме покоя LTC3330 потребляет менее 1 мкА, эта микросхема может успешно применяться в большинстве маломощных беспроводных систем с большим временем бездействия. Потери мощности

работающего источника питания составляют лишь малую часть от совокупной энергии, большая доля которой расходуется на функционирование датчика температуры и беспроводной сети.

### LDO-стабилизатор для питания и управления цепью сигнала

В составе ИС LTC3330 помимо двух импульсных преобразователей предусмотрен LDO-стабилизатор с отдельным выводом разрешения (Enable). Это очень удобная функция для коммутации питания рассматриваемой схемы, в которой источник опорного напряжения и цепь термистора подключены к выходу LDO-стабилизатора для минимизации шума переключения. Функция Enable LDO-стабилизатора позволяет управлять включением и выключением питания цепи прохождения сигнала, тогда как модуль беспроводной связи всегда включен.

Радиомодуль не потребляет большого количества мощности между передачами. Он должен быть всегда включен, поскольку синхронизация всей сети осуществляется с помощью его таймеров. Микропроцессор внутри этого модуля в заданное время управляет выводом Enable LDO-стабилизатора, готовя сигнальную цепь к измерению температуры.

### Флаг на выходе

Микросхема LTC3330 выставляет флаг на выходе (EH\_ON), который сообщает системе, откуда подается энергия — с батареи или солнечной панели. Флаг также может понадобиться конечному пользователю, получающему доступ к этой информации в реальном времени. Микропроцессор внутри радиомодуля считывает состояние флага и передает полученные данные по сети наряду с данными измерения температуры.

Логический уровень сигнала на выходе EH\_ON определяется напряжением внутренней шины питания LTC3330, зависящим от режима функционирования и может пре-

вышать 4 В. Чтобы не подключать этот вывод напрямую к логическому входу радиомодуля с более низким напряжением, выходное напряжение делится и подается на 10-разрядный АЦП микроконтроллера. В таком случае АЦП используется в качестве компаратора, который показывает, какой источник питания задействован.

**Полноценная беспроводная сеть с одним модулем**

LTP5901-IPM является полнофункциональным беспроводным модулем, в состав которого входит приемопередатчик, собственный микропроцессор и сетевое программное обеспечение (ПО). Для создания самоорганизующейся беспроводной сети и системы связи/сбора данных требуется установить лишь несколько соединений (рис. 5). Плата радиомодуля имеет небольшие размеры и легко устанавливается при пайке на основную плату с цепью прохождения сигнала и компонентами по управлению питанием. В этот модуль встроены все функции беспроводной сети, включая микропрограмму и РЧ-цепь. Трехпроводной SPI-интерфейс подключен к соответствующему порту LTC2484. Вывод DP2 порта общего назначения (GPIO) управляет порядком включения датчика. Собственный АЦП работает как транслятор уровня, считывая с LTC3330 значения флага состояния EH\_ON.

В этом приложении LTP5901-IPM выполняет две функции: беспроводной связи и управления с помощью микроконтроллера. При подаче питания на узлы LTP5901-IPM, расположенные рядом с устройством управления сетью, они автоматически опознают друг друга и начинают формировать ячеистую сеть. Вся сеть автоматически синхронизируется по времени, благодаря чему каждый приемопередатчик включается лишь на очень короткие установленные интервалы времени. В результате каждый узел способен работать не только как источник данных с датчика, но и как средство маршрутизации для передачи данных от других узлов менеджеру сети. Таким образом, создается высоконадежная ячеистая сеть с малым энергопотреблением, в которой у каждого узла есть множество каналов связи с менеджером несмотря на то, что все узлы, в том числе узлы маршрутизации, работают на малой мощности. Эта технология обеспечивает покрытие между узлами, находящимися друг от друга на расстоянии 100 м. В более благоприятных условиях радиус покрытия увеличивается.

В состав модуля LTP5901-IPM входит микропроцессор с ядром ARM Cortex-M3, действующим под управлением сетевого ПО SmartMesh IP. Ядро легко программируется для выполнения специфических задач с помощью микропрограммы, которая поставляется пользователям. Таким образом, обеспечивается возможность создавать широкий ряд решений, не используя дополнительных микропроцессоров. В данном случае собственный микропроцессор модуля LTP5901-IPM управляет последовательностью подачи питания на датчик температуры, включая и выключая LDO-стабилизатор ИС LTC3330 для экономии расхода электроэнергии. LTP5901-IPM считывает результаты измерений непосредственно через SPI-порт 24-разрядного АЦП. Наконец, модуль LTP5901-IPM считывает из LTC3330 состояние флага питания (EH\_on), указывающего на тип источника питания в определенный момент времени.

Для оценки мощности, потребляемой беспроводным модулем, применяются интерактивные средства SmartMesh Power и Performance Estimator [1]. Для стандартной сети, состоящей из 20 узловых устройств (motes), в которой 10 устройств подключены напрямую к менеджеру сети (через каналы с одним транзитным участком), а другие 10 имеют не прямое соединение с менеджером (через каналы с двумя транзитными участками), средний ток потребления составляет около 20 мкА для второй группы устройств и 40 мкА — для первой. Эти данные справедливы для каждого узла с частотой измерения один раз в 10 с.

Причина, по которой узловые устройства с прямым подключением потребляют в два раза больше энергии, чем узлы второй группы, состоит в том, что устройства первой группы не только передают соб-

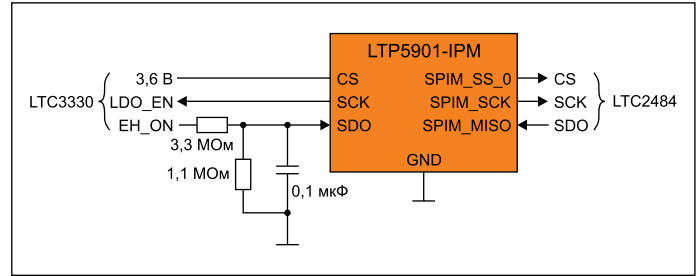


Рис. 5. Беспроводной модуль LTP5901-IPM

ственные данные с датчиков, но и направляют данные с некоторых узлов второй группы. Расчетные значения потребляемого тока можно сократить примерно вдвое, если отключить функцию извещения, которая позволяет распознавать новые узлы, подключаемые к сети.

**Общее потребление мощности**

Суммарная мощность потребления схемы зависит от ряда факторов, в том числе от того, как часто каждый датчик выполняет измерения температуры и как сконфигурированы сетевые узлы (рис. 6). Датчиковая цепь узла, осуществляющего измерения с частотой 1 раз в 10 с, как правило, потребляет менее 20 мкА, а на долю радиочастотной цепи приходится около 40 мкА.

Небольшая солнечная панель размерами 50×50 мм генерирует ток величиной 40 мкА при относительно умеренном освещении 200 лк и намного больший ток — при ярком свете. Таким образом, приложение может работать исключительно на солнечной энергии в различных условиях эксплуатации.

При питании схемы лишь от батареи емкостью 2,4 А·ч, например серии XOL от Tadiran, это приложение способно функционировать почти семь лет. В условиях плохого или меняющегося освещения схема автоматически переключается между питанием от солнечной панели и батареи, что повышает срок службы батареи.

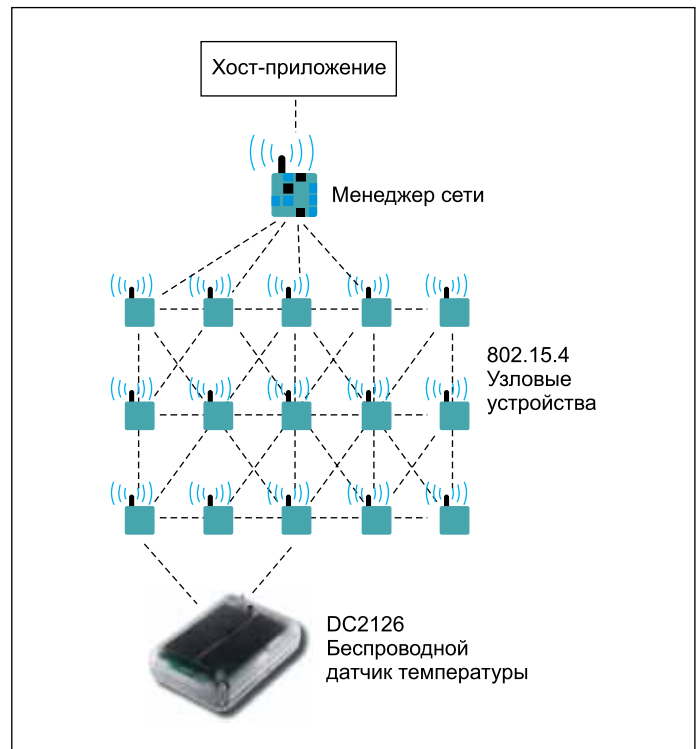


Рис. 6. Прецизионный датчик температуры легко подключается к беспроводной ячеистой сети SmartMesh IP, работающей с высокой надежностью

## Выводы

Автономные полноценные беспроводные сети датчиков создаются на основе блоков высокопроизводительной обработки данных, простых в эксплуатации радиочастотных устройств, а также цепей управ-

ления питанием. Синхронизированные по времени ячеистые сети обеспечивают надежную передачу данных между узлами при очень малом энергопотреблении. Для большей экономии расхода электроэнергии используется встроенный микропроцессор, который управляет продолжитель-

ностью подачи питания в цепи датчиков. В зависимости от условий эксплуатации эффективные ИС с высокой степенью интеграции переключают питание приложения на миниатюрную солнечную панель или небольшую батарею, действующую в течение многих лет. ■