

Роман Иванов (г. Санкт-Петербург)

# ВСЕ ДЛЯ РАБОТЫ С ТОКОВОЙ ПЕТЛЕЙ ОТ MAXIM INTEGRATED



**Токковая петля** – один из старейших интерфейсов, до сих пор остающихся актуальными. Огромная номенклатура операционных усилителей, ЦАП и АЦП, выпускаемая компанией Maxim Integrated, позволяет построить передатчик и приемник токовой петли практически для любых условий.

Интерфейс передачи информации «токковая петля» основан на изменении силы электрического тока, протекающего в цепи, связывающей приемник и передатчик. Его история своими корнями уходит в пятидесятые годы. Первоначально в нем использовался ток до 60 мА, но довольно быстро ток понизили до 20 мА.

Несмотря на появление большого количества новых интерфейсов, старая добрая токовая петля и по сей день активно применяется в разнообразном технологическом оборудовании, датчиках и исполнительных устройствах.

В данной статье мы остановимся на реализации интерфейса токовой петли на элементной базе компании Maxim Integrated – общепризнанного лидера в производстве интегральных схем для работы с аналоговыми и цифровыми сигналами.

## Аналоговая токовая петля

По виду передаваемой информации токовая петля делится на аналоговую и цифровую. В цифровой токовой петле уровнем тока передается всего два состояния – логический ноль либо логическая единица. Аналоговая токовая петля гораздо интереснее в этом плане – уровнем тока транслируется весь диапазон значений передаваемой величины, поэтому построение такой петли гораздо сложнее и требует больше времени. В данной статье мы рассмотрим основные аспекты реализации интерфейса аналоговой токовой петли на примере конкретных схемотехнических решений.

Как уже упоминалось, в токовой петле для передачи данных используется ток, а не напряжение. Это и является основным преимуществом данного интерфейса, поскольку ток, вытекающий из источника тока, проходя по длинным

кабельным линиям, практически не изменяет свое значение. Потерями тока из-за утечек кабеля можно пренебречь. К тому же, токовая петля довольно устойчива к помехам. Эти обстоятельства позволяют связывать два устройства по токовой петле на расстоянии нескольких километров. Немаловажным плюсом является использование всего двух проводов, по которым, кроме передачи данных, можно еще и запитывать устройства.

Как и в большинстве интерфейсов, в токовой петле можно выделить три составляющие: передатчик, приемник и защиту линии (рисунок 1).

Передатчик осуществляет преобразование данных, полученных от датчика (в цифровой или аналоговой форме), в соответствующий им ток 0 (4)...20 мА для его дальнейшей передачи по линии связи. Приемник, соответственно, осуществляет обратное преобразование.

Вариантов реализации данных задач довольно много и конкретное решение зависит от типа датчика, требований точности, параметров линии передачи и конечной стоимости решения.

Для защиты передатчика от нештатных ситуаций можно включить в линию передачи схему защиты.

Рассмотрим конкретные варианты реализации токовой петли на элементной базе Maxim.

## Передача сигнала токовой петли

Начнем с построения передатчиков. Рассмотрим несколько схемотехнических решений для передачи сигнала токовой петли.

### ЦАП с токовым выходом MAX5661

Одним из несложных решений для построения передатчика токовой петли является использование однокристового преобразователя с токовым выходом MAX5661, программируемого по интерфейсу SPI.

Микросхема MAX5661 предоставляет разработчику все необходимые инструменты для разработки приложений, работающих с токовыми и потенциальными выходными сигналами.

Выходные усилители обеспечивают выходное напряжение в стандартном промышленном диапазоне  $\pm 10$  В или выходной ток 0 (4)...20 мА. Потенциальный выход (OUTV) рассчитан на резистивную нагрузку более 2 кОм и емкостную – до 1,2 мкФ.

Токковый выход (OUTI) при работе на резистивную нагрузку выдает напряжение до 37,5 В, а также работает на индуктивную нагрузку до 1 Гн. При работе микросхемы активным может быть только один выход.

MAX5661 выпускается в 64-выводном корпусе LQFP с габаритными размерами 10x10 мм и работает в рас-

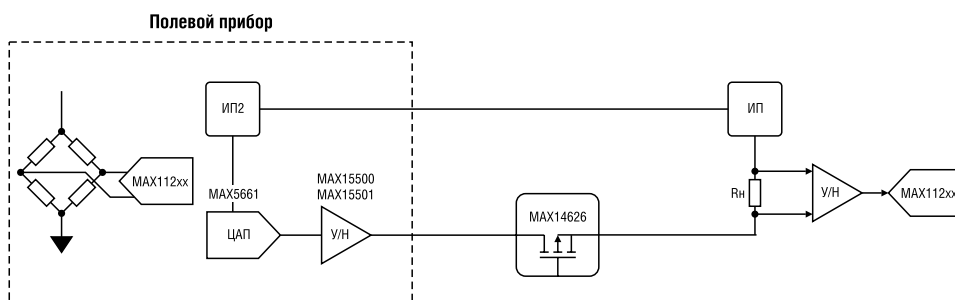


Рис. 1. Схема реализации токовой петли

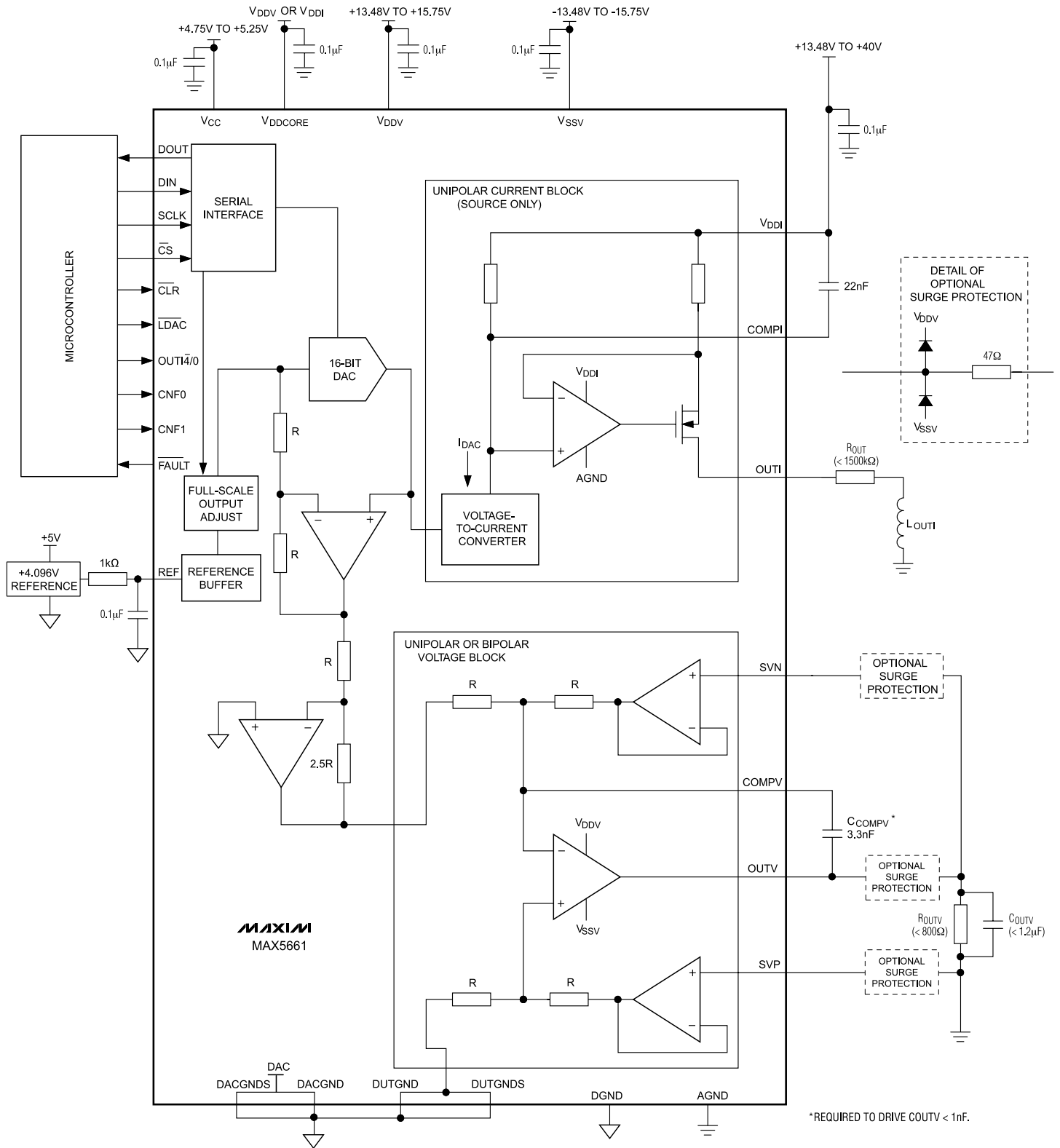


Рис. 2. Типовая схема включения MAX5661

ширном температурном диапазоне  $-40...105^{\circ}\text{C}$ .

Для подключения преобразователя к микроконтроллеру используется 4-проводной SPI-совместимый последовательный интерфейс. MAX5661 выступает в качестве ведомого и поддерживает скорость передачи данных до 10 Мбит/с.

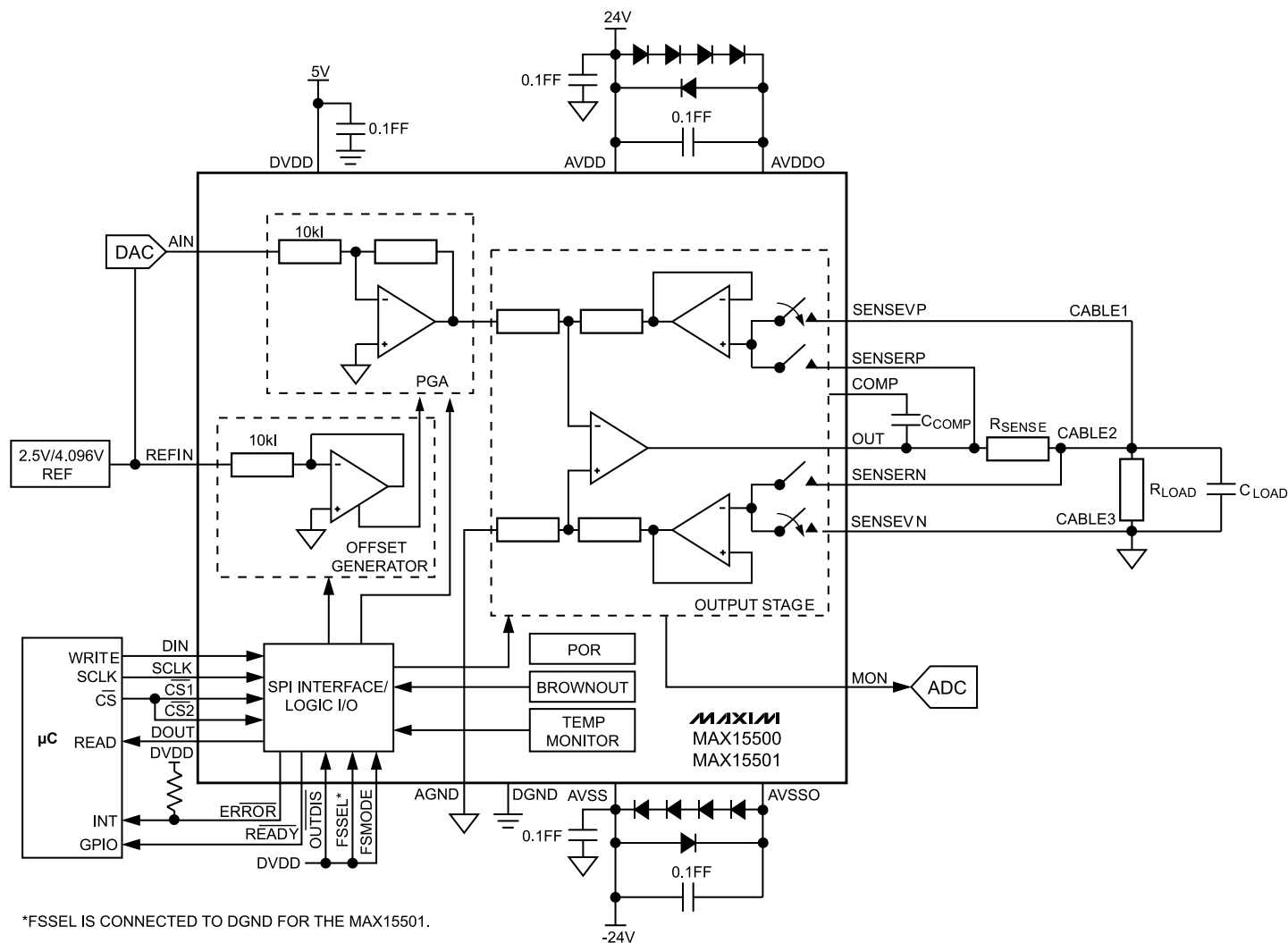
При классическом подключении по SPI-шине нескольких устройств сигналы ввода данных (DIN), вывода дан-

ных (DOUT) и тактирующие сигналы (SCLK) подключаются параллельно, а обращение к конкретной микросхеме задается линией выбора чипа (CS). Такая схема построения достаточно легко реализуема, когда количество ведомых устройств в системе не очень велико.

Микросхема MAX5661 позволяет реализовать, в дополнение к классическому подходу соединения, альтернативный метод последовательного

подключения (Daisy chain). При последовательном подключении запараллеливаются сигналы SCLK и CS, а DIN проходит через микросхему и с выхода (DOUT) поступает на вход следующей. Это позволяет снизить количество линий CS и DIN, экономя место на плате и ресурсы управляющего микроконтроллера.

На рисунке 2 представлена стандартная схема включения MAX5661.



\*FSSSEL IS CONNECTED TO DGND FOR THE MAX15501.

Рис. 3. Типовая схема включения MAX15500/15501

### Формирователи токового выхода MAX15500/15501

Другим простым решением для построения передатчика токовой петли является использование формирователя аналоговых выходных сигналов с токовым выходом **MAX15500/15501**.

Микросхемы обеспечивают программируемый выходной ток до  $\pm 24$  мА и напряжение до  $\pm 12$  В, пропорциональное управляющему сигналу. В качестве такого сигнала выступает напряжение, которое обычно подается с внешнего ЦАП в диапазоне 0...4,096 В для MAX15500 и в диапазоне 0...2,5 В для MAX15501. Выходные сигналы тока и напряжения могут быть как биполярными, так и униполярными.

Выходы MAX15500/MAX15501 имеют защиту от перегрузки по току и короткого замыкания в нагрузке, а также схему защиты по ценам питания до  $\pm 35$  В. Чип имеет встроенные мониторы температуры и питания для защиты от перегрева и провалов напряжения с программируемым предельным значением напряжения источника питания.

Для задания режимов работы микросхем имеется SPI-интерфейс с под-

держкой последовательного включения. В дополнение к SPI у микросхем имеется один выход с открытым коллектором для передачи сигнала прерывания.

MAX15500/MAX15501 работают в расширенном температурном диапазоне  $-40...105^{\circ}\text{C}$  и выпускаются в 32-контактном корпусе TQFN размером 5x5 мм.

На рисунке 3 представлена стандартная схема включения MAX15500/15501.

### Операционные усилители в качестве формирователя токового выхода

И последним рассмотренным способом построения передатчика токовой петли является использование операционных усилителей. Данный вариант является самым трудоемким, но дает достаточно гибкие решения, ограниченные только фантазией разработчика.

За основу возьмем операционный усилитель **MAX9943**.

MAX9943 представляет собой высоковольтный операционный усилитель, обеспечивающий высокую точность, низкий уровень температурного дрейфа и низкое потребление энергии. Усили-

тель работает от однополярного источника питания номиналом 6...38 В или двухполярного источника питания номиналом  $\pm 3... \pm 19$  В. MAX9943 идеально подходит для применения в системах формирования сигналов датчиков, высокопроизводительных промышленных измерительных системах и системах с питанием от контура (передатчики с током 4...20 мА).

Усилитель выпускается в 6-выводном компактном корпусе TDFN или 8-выводном корпусе  $\mu\text{MAX}$  и рассчитан на работу в расширенном температурном диапазоне  $-40...125^{\circ}\text{C}$ .

На рисунке 4 представлена стандартная схема реализации преобразователя напряжения в ток с использованием операционного усилителя MAX9943.

Связь между входным напряжением и током нагрузки описывается выражением:

$$V_{IN} = (R_2/R_1) \times R_{SENSE} \times I_{LOAD} + V_{REF}$$

Сопротивление нагрузки  $R_{LOAD}$  может достигать нескольких кОм. Номинал резистора  $R_{SENSE}$  выбирается небольшим — несколько десятков Ом.

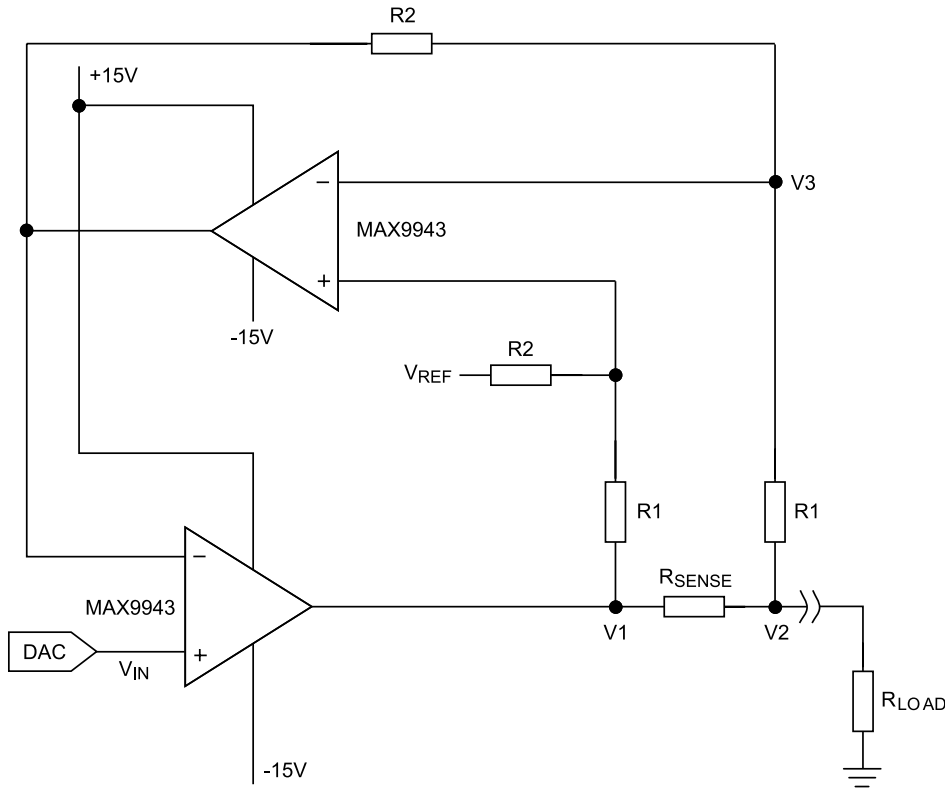


Рис. 4. Преобразователь напряжения в ток на основе MAX9943

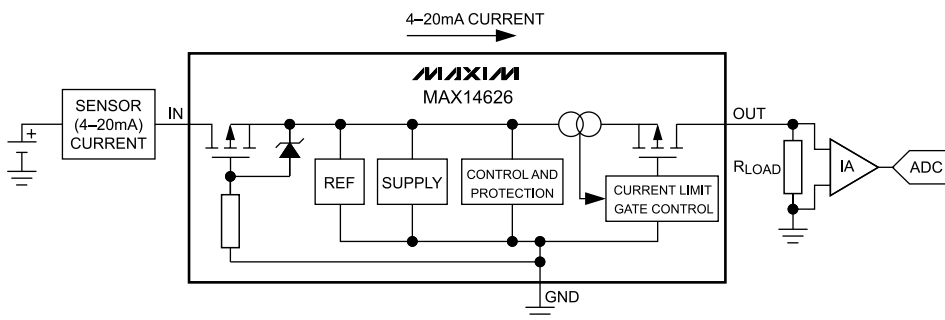


Рис. 5. MAX14626

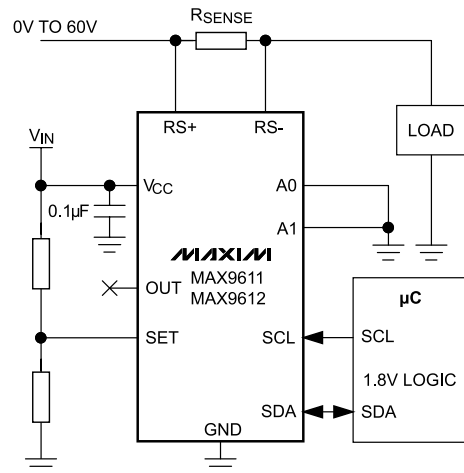


Рис. 6. Типовая схема включения MAX9611/MAX9612

Подробное описание данного решения с расчетами и графиками можно найти в «APPLICATION NOTE 4394» на сайте Maxim.

**Ограничитель тока MAX14626 для защиты токовой петли**

Для защиты токовой петли 4...20 мА от нештатных ситуаций компания Maxim предлагает специализированную микросхему защиты **MAX14626** (рисунок 5). В основе чипа лежит токоограничивающий ключ, имеющий сопротивление в открытом состоянии 25 Ом и работающий в диапазоне входных напряжений 2,3...36 В.

Ограничение по току составляет 30 мА, что делает MAX14626 идеальной для применения в качестве защиты мо-

дулей ввода аналоговых сигналов с датчиков. Определение перегрузки по току происходит в непрерывном режиме.

К дополнительным защитным функциям микросхемы относятся отключение при перегреве и блокировка обратного включения для защиты от неправильного включения.

MAX14626 доступна в миниатюрном TDFN-корпусе с шестью выводами размером 3x3 мм и рассчитана на работу в промышленном температурном диапазоне -40...85°C.

**Прием сигнала токовой петли**

Теперь пора рассмотреть несколько схемотехнических решений для приема сигнала аналоговой токовой петли.

**Токоизмерительные усилители MAX9611 и MAX9612**

**MAX9611** и **MAX9612** — это высоковольтные токоизмерительные усилители со встроенным блоком усиления, которые могут быть использованы в режиме операционного усилителя или компаратора с возможностью дальнейшей оцифровки аналогового сигнала на 12-разрядном АЦП.

Широкий диапазон входных напряжений 0...60 В более чем достаточен для работы с токовой петлей, а программируемый размах измеряемого дифференциального напряжения (440, 110 и 55 мВ) позволяют достичь достаточно точного измерения входного тока путем подбора необходимого шунтового резистора.

Преобразованный в напряжение ток оцифровывается встроенным 12-разрядным АЦП, управляемым по I<sup>2</sup>C-интерфейсу. Скорость преобразования составляет до 500 выб/сек.

Весьма интересна адресация к микросхеме: адресных битов всего два, но они позволяют подключать до 16 чипов на одной шине. Весь секрет кроется в том, что на адресные входы подаются не только напряжения питания и ноль, но еще 1/3 и 2/3 от уровня питания.

Шина I<sup>2</sup>C совместима с логическими уровнями 1,8 В и 3,3 В, что позволяет подключать микросхему к большинству современных микроконтроллеров.

Для питания потребуется источник с выходным напряжением 2,7...5,5 В.

Встроенный температурный сенсор позволяет измерять температуру кристалла во всем рабочем диапазоне с точностью до 0,48°C.

Микросхемы рассчитаны на работу в расширенном температурном диапазоне -40...125°C и выпускаются в небольшом 10-выводном µMAX®-корпусе размером 3x5 мм.

Отличие MAX9611 от MAX9612 — в том, что первая включается по неинвертирующей схеме, а вторая — по инвертирующей.

Доступны отладочные средства — **MAX9611EVKIT**.

Типичная схема включения представлена на рисунке 6.

**Токоизмерительный усилитель MAX9938**

**MAX9938** — прецизионный усилитель со встроенным блоком усиления, предназначенный для контроля тока. В отличие от MAX9611/ MAX9612, он не содержит встроенного АЦП, а имеет потенциальный выход, поэтому требуется дополнительное АЦП. С одной стороны, это увеличивает количество элементов и конечную стоимость решения, а с другой — дает возможность разработчику выбрать необходимый ему преобразователь.

Усилитель имеет небольшое входное напряжение смещения, составляющее не более 500 мкВ, а разброс коэффициента передачи лежит в пределах 0,5%.

Собственное потребление очень мало и составляет порядка 1 мА.

Усилитель рассчитан на работу с синфазными напряжениями на входах в пределах 1,6...28 В.

Выпускается три версии усилителя с различным коэффициентом передачи: 25 В/В (**MAX9938T**), 50 В/В (**MAX9938F**) и 100 В/В (**MAX9938H**). Возможность выбора коэффициента передачи дает определенную свободу в выборе внешнего токоизмерительного резистора.

MAX9938 выпускается в крошечном корпусе UCSP с размерами 1x1 мм, либо в 5-выводном корпусе SOT23, и рассчитан на работу в пределах температурного диапазона -40...85°C.

Типичная схема включения представлена на рисунке 7.

**Дельта-сигма аналого-цифровой преобразователь MAX11205**

**MAX11205** — это 16-разрядный одноканальный дельта-сигма аналого-цифровой преобразователь с ультранизким энергопотреблением (максимальный ток в активном режиме <300 мкА) и последовательным выходом.

Микросхема обеспечивает самое высокое соотношение разрядности к потребляемой мощности и оптимизирована для построения решений, требующих сочетания широкого динамического диапазона и низкого энергопотребления.

АЦП содержит встроенный высокоточный тактовый генератор, который не требует подключения дополнительных внешних элементов.

MAX11205 обеспечивает связь по простому двухпроводному последовательному интерфейсу и выпускается в небольшом 10-выводном корпусе μMAX. Диапазон рабочих температур составляет -40...85°C.

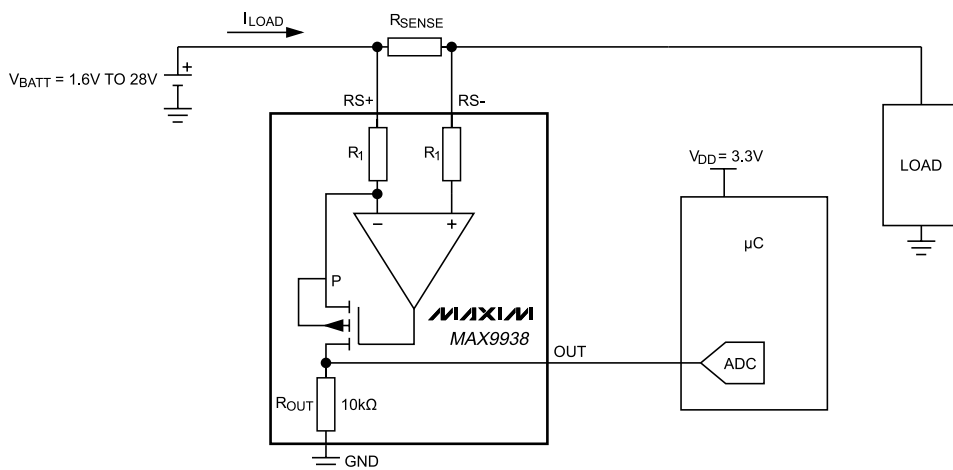


Рис. 7. Типовая схема включения MAX9938

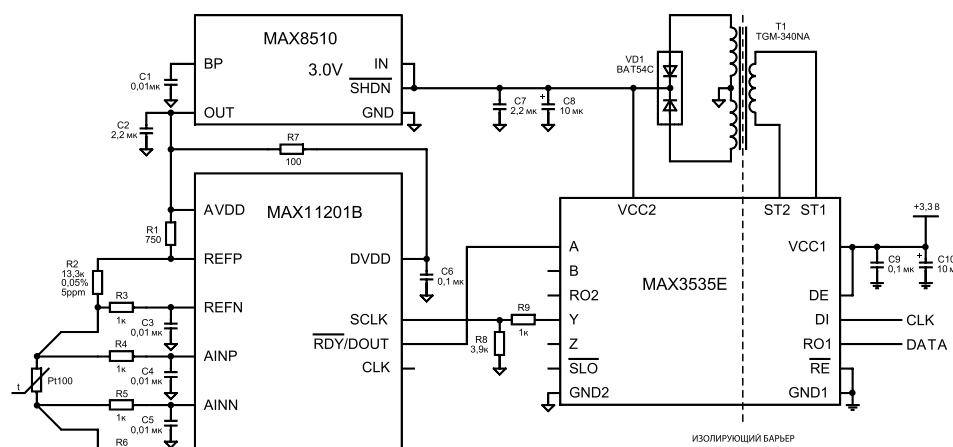


Рис. 8. Гальванически изолированный прецизионный измеритель сигнала токовой петли

На рисунке 8 представлена схема построения гальванически изолированного прецизионного измерителя сигнала токовой петли на основе MAX11205 [1].

В качестве токового шунта используется прецизионный резистор R1, напряжение с которого оцифровывается на MAX11205. Для гальванической развязки линии данных и напряжения питания используется микросхема **MAX3535E**, а для стабилизации изолированного напряжения питания и генерации опорного напряжения — **MAX6033A30**.

**Операционные усилители в качестве токового входа**

Так же, как и в случае передатчиков токовой петли, построение приемников токовой петли на основе операционных усилителей является самым трудоемким, но максимально гибким.

За основу схемы возьмем операционный усилитель **MAX44250**.

MAX44250 — одноканальный прецизионный малошумящий операционный усилитель с широким диапазоном питающих напряжений. Отличитель-

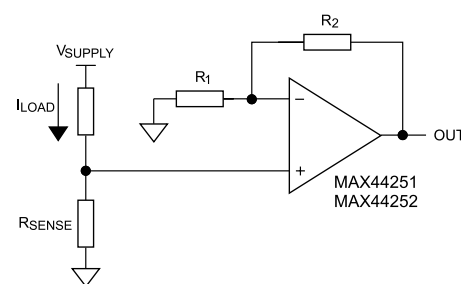


Рис. 9. Преобразователь тока в напряжение на основе MAX44250

ными особенностями данного семейства являются низкие значения входного шума (5,9 нВ/√Гц), напряжения смещения (6 мкВ) и температурного дрейфа 19 нВ/°C (макс).

Такие высокие метрологические характеристики делают этот усилитель идеальным для применения в измерительных трактах.

MAX44250 работает в диапазоне температур -40...125°C и выпускается в 5-пиновом SOT23 или 8-пиновом μMAX.

На рисунке 9 представлена стандартная схема реализации преобразователя

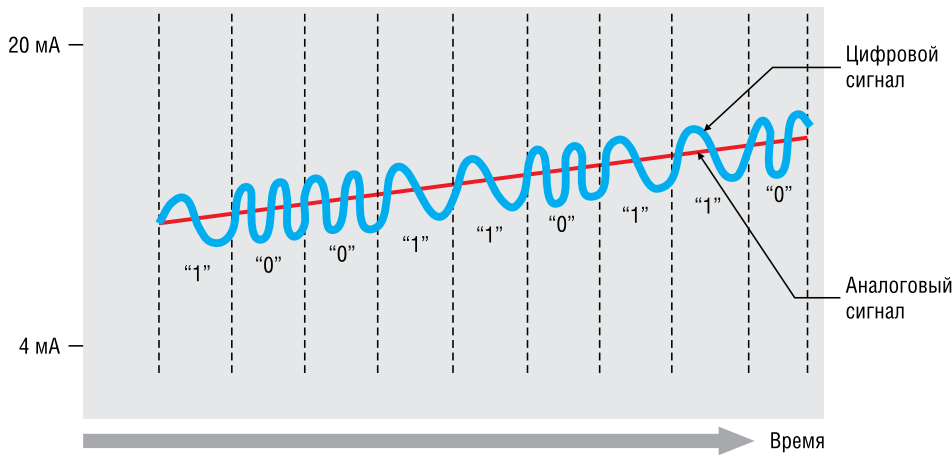


Рис. 10. HART-протокол

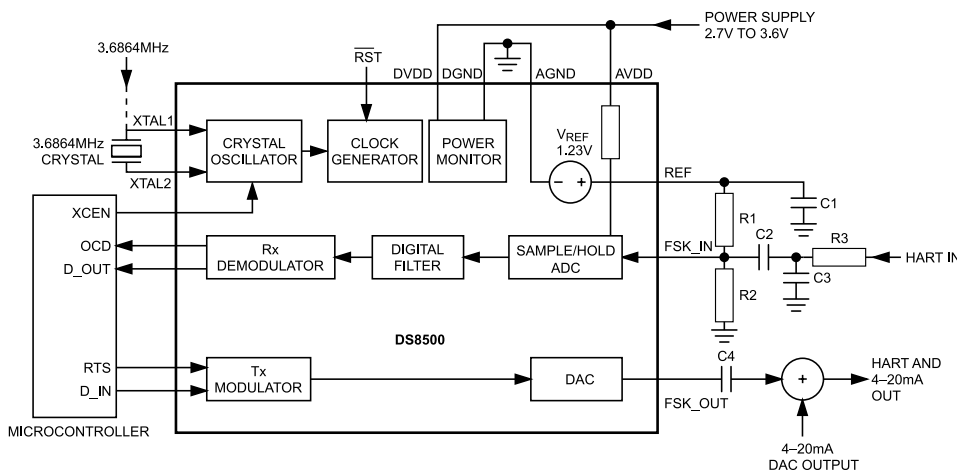


Рис. 11. Типовая схема включения DS8500

тока в напряжение с использованием операционного усилителя MAX44250.

Связь между входным током  $I_{LOAD}$  и напряжением на выходе  $V_{OUT}$  описывается следующим выражением:

$$V_{OUT} = (I_{LOAD} \times R_{SENSE}) \times (1 + R_2/R_1).$$

Сопротивление  $R_{SENSE}$  выступает в качестве токового шунта и, благодаря изменяемому с помощью резисторов  $R_2/R_1$  коэффициенту усиления, его можно менять в достаточно большом диапазоне. При необходимости его можно уменьшать до нескольких Ом.

Выход операционного усилителя подключается, как правило, к АЦП.

### HART-протокол

HART-протокол (*Highway Addressable Remote Transducer Protocol*) –



Рис. 12. Cupertino (MAXREFDES5#)

но просто разделяются фильтрами приемника и проходят независимую обработку.

### HART-модем DS8500

Для реализации HART протокола компания Maxim предлагает однокристальное решение – модем **DS8500**.

Чип содержит встроенные модулятор и демодулятор сигнала 1200/2200 Гц, имеет очень низкое энергопотребление и, благодаря интегрированной цифровой сигнальной обработке, требует незначительной внешней обвязки. Входной сигнал проходит семплирование на АЦП и поступает на цифровой фильтр/демодулятор. Такая конструкция модема позволяет уверенно обнаруживать сигнал даже в зашумленной среде. Выходной ЦАП генерирует синусоидальное напряжение и сохраняет сдвиг фаз при переключении частот 1200 и 2200 Гц. Низкое энергопотребление достигается за счет отключения схем приемника во время передачи сигнала и наоборот (при приеме не работает передатчик). Все это делает DS8500 идеальным решением для создания малопотребляющих передатчиков систем управления технологическими процессами.

Микросхема выпускается в миниатюрном 20-выводном корпусе TQFN 5x5x0,8 мм и рассчитана на работу в промышленном температурном диапазоне -40...85°C.

На рисунке 11 представлена типовая схема применения DS8500.

Поскольку в чип интегрирован цифровой фильтр, то снаружи необходим только простой пассивный RC-фильтр. На резисторе R3 и конденсаторе C3 реализован фильтр нижних частот с частотой среза 10 кГц. C2 и R2/R1 образуют фильтр верхних частот с частотой среза 480 Гц. Резисторный делитель, образованный R1 и R2, обеспечивает смещение входного напряжения  $V_{ref}/2$  ( $R1 = R2$ ) на входе АЦП. Конденсатор C4 обеспечивает развязку синусоидального сигнала с выхода ЦАП DS8500 и аналоговой токовой петли. Емкость C4 обычно выбирается не менее 20 нФ.

### Средства отладки

Компания Maxim предлагает несколько аналоговых модулей для изучения токовой петли.

### Cupertino (MAXREFDES5#)

**MAXREFDES5#** (рисунок 12) – это универсальный аналоговый модуль компании Maxim для работы с аналоговыми сигналами в диапазоне  $\pm 10$  В и токовой петлей 4...20 мА. Плата имеет гальванически изолированную систему питания и обеспечивает гальваническую развязку сигналов данных.



Рис. 13. Campbell (MAXREFDES4#)

В основе Cupertino лежит малопотребляющий 16-разрядный АЦП последовательного приближения **MAX1301**, осуществляющий преобразование аналоговых сигналов и передачу полученных результатов по SPI-шине. Для буферизации аналоговых сигналов установлены операционные усилители **MAX9632**. Гальваническая развязка обеспечивается цифровым изолятором **MAX14850** и драйвером трансформатора **MAX256**.

Cupertino выполнен в виде отдельного модуля, что позволяет использовать его в микропроцессорных системах собственной разработки как готовое устройство.

Для оценки возможностей можно использовать отладочные платы Nexys 3 или ZedBoard™, выполненные на основе довольно мощных ПЛИС. MAXREFDES5#

подключается к этим платам в качестве дополнительного модуля.

### Campbell (MAXREFDES4#)

**MAXREFDES4#** (рисунок 13) — это законченное решение для работы с аналоговыми сигналами в диапазоне 0,2...4,096 В или токовой петлей 4...20 мА. Плата обеспечивает гальваническую изоляцию питания и сигналов данных.

В основе Campbell лежат высокоточный 16-разрядный АЦП **MAX11100** и прецизионный малопотребляющий операционный усилитель **MAX44250**. Решение выполнено в виде отдельного модуля, что позволяет использовать его самостоятельно в своих разработках.

Для знакомства также подойдут отладочные платы Nexys 3 или ZedBoard.

### Заключение

Компания Maxim имеет в своем арсенале все необходимое для организации передачи информации по токовой петле. Выбор операционных усилителей, ЦАП и АЦП поистине колоссален и может удовлетворить практически любые требования разработчиков. Имея в своем распоряжении такую элементную базу, можно создать как самое простое и недорогое решение, так и сложный многофункциональный комплекс с уникальными возможностями.

Все изложенные в данной статье схемотехнические решения не следует воспринимать как догму. Аналоговая электроника очень сложна и не имеет универсальных решений. Набор элементов всегда уникален для каждого конкретного случая.

### Литература

1. Андрусевич А. «Сигма-дельта АЦП компании MAXIM», Электронные компоненты №12, 2010.

Получение технической информации,  
заказ образцов, поставка –  
e-mail: analog.vesti@compel.ru



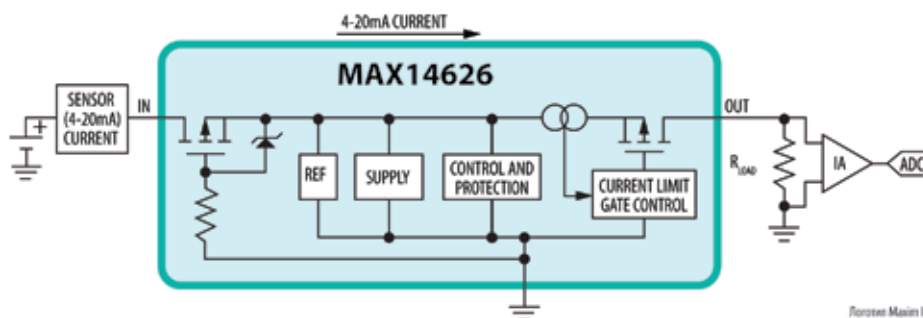
## MAX14626 – защита токовой петли 4–20 мА

### Отличительные особенности

- Точность 10%
- Потребление (max) 50 мкА
- Сопротивление канала ~25 Ом
- Напряжение питания: 2,3...40 В
- Защита от перегрева
- Защита от переплюсовки
- Корпус 3 x 3 мм TDFN

### Применения

- Промышленные системы
- Системы контроля
- Системы с аналоговыми датчиками



©2008 Maxim Integrated – торговая марка Maxim Integrated Products, Inc.

Москва  
Тел.: (495) 234-7764, доб. 2328  
Соколов Андрей  
E-mail: a.sokolov@compel.ru

Санкт-Петербург  
Тел.: (812) 327-9403, доб. 4219  
Червинский Михаил  
E-mail: cmv.spb@compel.ru

Компэл  
www.compel.ru