А. Ю. Пономарев

Приемопередатчик интерфейса 4-20 мА

Аннотация. Рассматриваются принципы работы и особенности реализации устройства, выполняющего как функции приемника интерфейса 4–20 мА, так и функции передатчика интерфейса 4–20 мА, с питанием от токовой петли этого интерфейса. Данное устройство применяется при создании сенсорных сетей, для измерения параметров состояния сложных технических объектов и дистанционной передачи полученных данных.

Ключевые слова и фразы: сенсорные сети, токовая петля, интерфейс 4-20 мА.

Введение

Одним из широко распространенных интерфейсов, используемых в сенсорных сетях для ввода-вывода данных, является интерфейс «токовая петля 4–20 мА», т.к. датчики и исполнительные механизмы с этим интерфейсом более дешевы, чем модули с интерфейсами RS-485 или ZigBee. Представленные на рынке устройства, которые обеспечивают использование датчиков и исполнительных механизмов с интерфейсом 4–20 мА в сенсорной сети, обычно могут осуществлять либо передачу, либо прием данных [1–3].

В данной работе рассматривается устройство, выполняющее как функции приемника, так и функции передатчика интерфейса 4–20 мА, с питанием от токовой петли этого интерфейса.

1. Принцип работы

Схема приемопередатчика интерфейса 4–20 мА представлена на рис. 1.

Приемопередатчик интерфейса 4–20 мА состоит из последовательно включенных в токовую петлю приемной части 1, управляющего микроконтроллера 4 с внешним питанием 5 и передающей части 3,

Результаты получены в рамках НИР «Исследование и разработка перспективных решений задач мониторинга и управления на основе Интернет-технологий», № 01201455358, ФАНО России.

© А. Ю. Пономарев, 2015

© Институт программных систем имени А. К. Айламазяна РАН, 2015

© Программные системы: теория и приложения, 2015

разом. При включении приемопередатчика в токовую петлю источник тока 8 открыт, поэтому входной ток обеспечивает падение напряжения на параллельном стабилизаторе 2, достаточное для питания АЦП 7 и ЦАП 9. После включения ЦАП 10 выходной ток приемопередатчика устанавливается на минимальном уровне, который определяется начальным током источника тока 9 и должен быть не меньше тока собственного потребления приемопередатчика. Микроконтроллер 4 конфигурирует АЦП 7 и ЦАП 9.

При работе приемопередатчика в режиме передачи управляющий микроконтроллер 4 записывает в ЦАП 9 значение, соответствующее выходному току, и проверяет ток передачи, считывая данные с выхода АЦП 7. При несовпадении измеренного тока и тока передачи микроконтроллер формирует сигнал ошибки. При этом приемопередатчик работает как обычный передатчик 4–20 мА с питанием от токовой петли.

При работе в режиме приема микроконтроллер записывает в ЦАП значение, соответствующее току, заведомо превышающему диапазон входных токов, например, 22 мА для диапазона 4–20 мА. Так как это значение больше тока в токовой петле, то источник тока полностью открывается и не влияет на работу схемы, в этом случае приемопередатчик работает как обычный приемник 4–20 мА с питанием от токовой петли. Ток токовой петли вызывает падение напряжения на датчике тока, и АЦП преобразует его в цифровой вид. Микроконтроллер считывает из АЦП значения, соответствующие току в токовой петле. Однако, если ток в токовой петле превысит установленный в ЦАП уровень, то источник тока начинает закрываться, и приемопередатчик переходит в режим ограничения тока, что обеспечивает защиту от неправильного подключения или неисправности передатчика в токовой петле.

Выбор выполняемой функции — прием или передача данных — осуществляется посредством управляющего микроконтроллера через программную конфигурацию.

Если чувствительность или диапазон входных напряжений АЦП не позволяют подключить его непосредственно к датчику тока, то между датчиком тока и АЦП может быть включен инвертирующий усилитель. Еще один усилитель — усилитель сравнения — может быть

включен между ЦАП и управляемым источником тока для компенсации нелинейности источника тока и задания начального тока источника тока. В этом случае приемопередатчик работает следующим образом. При включении приемопередатчика интерфейса 4–20 мА в токовую петлю источник тока полностью открыт, поэтому входной ток обеспечивает падение напряжения на параллельном стабилизаторе, достаточное для питания инвертирующего усилителя, усилителя сравнения, АЦП и ЦАП. После включения инвертирующего усилителя и усилителя сравнения начинает работать отрицательная обратная связь с выхода источника тока, и выходной ток приемопередатчика устанавливается на минимальном уровне, который определяется смещением усилителя сравнения и должен быть не меньше тока собственного потребления приемопередатчика. При работе в режиме передачи усилитель сравнения формирует сигнал управления источником тока, сравнивая сигнал с выхода ЦАП и сигнал датчика тока или инвертирующего усилителя. В остальном работа приемопередатчика аналогична выше рассмотренному варианту.

При работе приемопередатчика в режиме передатчика приемник не влияет на значение формируемого передатчиком тока, но позволяет оперативно контролировать ток передачи, который может отличаться от заданного из-за низкого напряжения питания или повышенного сопротивления проводов токовой петли. При работе приемопередатчика в режиме приемника передатчик нужно сконфигурировать на выдачу тока, несколько превышающего верхнюю границу измеряемого диапазона токов. В результате этого передатчик не будет влиять на ток в токовой петле, пока ток находится в пределах измеряемого диапазона, и будет ограничивать ток, если он выходит за верхнюю границу измеряемого диапазона. Благодаря этому реализуется автоматическая защита от превышения входного тока, поскольку ток ограничивается на уровне, установленном в передатчике, что повышает надежность устройства.

Объединение функций передачи и приема информации по токовому интерфейсу 4–20 мА в одном устройстве позволяет упростить систему приема-передачи информации по такому интерфейсу, уменьшить номенклатуру компонентов и минимизировать их складские запасы.

Рис. 2. Принципиальная схема модуля АЮ14

2. Реализация устройства

Рассмотренная выше схема работы приемопередатчика интерфейса 4–20 мА была использована при разработке модуля АЮ14, предназначенного для эксплуатации в составе узлов сенсорной сети семейства Ботик-сенсор. Модуль АЮ14 входит в состав периферийного узла сенсорной сети и предназначен для передачи данных между датчиками /исполнительными механизмами и базовым модулем сенсорной

сети [4].

Принципиальная схема устройства показана на рис. 2.

Модуль состоит из двух гальванически развязанных частей: подсоединенного к токовой петле 4–20 преобразователя ток-код и код-ток и подключенной к шине передачи данных XP1 микропроцессорной части.

Гальваническая развязка реализована на специализированной микросхеме цифрового изолятора интерфейсов DD1.

Двухнаправленная шина данных SDA реализована на передатчике и приемнике DD1, резистор R2 исключает конфликт передатчика DD1 с другими передатчиками на шине. Еще два передатчика DD1 используются для синхронизации передаваемых данных сигналами SYNC и SCL.

Общая аналоговая часть приемника и передатчика состоит из датчика тока R24–R25, инвертирующего усилителя DA5, усилителя сравнения DA6 и управляемого источника тока VT1. в качестве датчика тока применены три параллельно включенные резистора R24, R25, R26 сравнительно большого сопротивления, это позволяет использовать распространенные недорогие детали. Датчик тока подключен между аналоговой землей устройства и «–» токовой петли, поэтому напряжение на датчике имеет отрицательную полярность. Для преобразования полярности и усиления сигнала датчика используется инвертирующий усилитель DA5 с коэффициентом усиления 2. Сборка прецизионных резисторов R17:1 и R17:2 определяет коэффициент усиления, резистор R22 компенсирует разность входных токов усилителя. С выхода инвертирующего усилителя сигнал поступает на АЦП DA3, который вырабатывает код, пропорциональный току токовой петли. Сигнал с выхода инвертирующего усилителя поступает на инвертирующий вход усилителя сравнения DA6, неинвертирующий вход DA6 подключен к выходу ЦАП DA4. Таким образом, сигнал на выходе усилителя сравнения пропорционален разности этих сигналов. Результат сравнения подается на управляемый источник тока.

Управляемый источник тока выполнен на полевом транзисторе обедненного типа VT1. Особенностью этого типа транзисторов является проводимость при отсутствии управляющего напряжения, что

необходимо для старта устройства при подключении к токовой петле. Резистор R20 обеспечивает начальное нулевое смещение, местная обратная связь по току на резисторе R18 ограничивает пиковый ток транзистора на уровне $50 \div 100$ мА.

Датчик тока и источник тока включены последовательно в токовую петлю, таким образом, замыкается общая отрицательная обратная связь инвертирующего усилителя и усилителя сравнения. Корректирующая цепочка R19 C9 обеспечивает устойчивость обратной связи.

Значение регулируемого тока определяется смещением на неинвертирующем входе DA6, смещение задается делителем R14, R15 или подается с выхода ЦАП DA4 через диод VD3. Вход обратной связи VFB встроенного в DA4 выходного усилителя подключен после VD3, поэтому падение напряжения на диоде не влияет на точность установки смещения.

Аналого-цифровой преобразователь DA3 подключен к выходу инвертирующего усилителя и преобразует измеренное значение тока в 16-ти разрядный код. Источники опорного напряжения АЦП и ЦАП встроенные, независимые, что позволяет контролировать точность передачи тока.

Аналоговая часть питается непосредственно от токовой петли, для этого последовательно с датчиком тока R24-R25 и управляемым источником тока VT1 включен параллельный стабилизатор DA7. Делитель R21/R23 задает напряжение стабилизации около 3.0В. Блокировочный конденсатор C11 обеспечивает низкое выходное сопротивление стабилизатора на высоких частотах. Для защиты от переполюсовки в цепь токовой петли включен диод VD4. Фильтр R16 C10 устраняет влияние высокочастотных помех.

Микроконтроллер принимает команды управления в цифровой форме в режиме ведомого на шине BotikBus. При получении команды на измерение тока микроконтроллер через гальваническую развязку и 2-проводный интерфейс I2C выдает на АЦП DA3 команды измерения напряжения на выходе инвертирующего усилителя DA5 и получает от АЦП результат измерения. Микроконтроллер обрабатывает полученные результаты с использованием таблицы поправок и передает результат измерения, представленный в миллиамперах, по

шине BotikBus. При получении команды на выдачу тока микроконтроллер через гальваническую развязку и 3-проводный интерфейс SPI выдает на ЦАП DA4 код, соответствующий выдаваемому току.

Для измерения температуры окружающей среды к источнику опорного напряжения микроконтроллера DD2 подключен делитель из резистора R5 и терморезистора с отрицательным температурным коэффициентом RK1. Напряжение с выхода делителя измеряется АЦП, встроенным в микроконтроллер. Точность измерения температуры без калибровки $\pm 3^\circ \text{C}$, этого достаточно для коррекции температурных погрешностей ЦАП DA6 и АЦП DA5.

Кроме основной функции — приема или передачи тока токовой петли 4-20 — модуль АЮ14 может считывать данные с цифровых датчиков при помощи двух цифровых входов и управлять внешним устройством при помощи цифрового выхода. Цифровые входы реализованы на входах PC0–PC3 микроконтроллера DD2, делители R10, R11 и R12, R13 позволяют изменять пороговое напряжение входов.

В случае использования датчиков с выходом «открытый коллектор» могут быть реализованы два варианта подтяжки входов при помощи резисторов R7и R8. Для минимального тока подтяжки выдается «1» на вывод PB1 микроконтроллера DD2, сигнал PULLUP через ограничивающий ток резистор R6 и диод VD1 поступает на подтягивающие резисторы. Если для работы датчиков требуется большой ток, то можно подключить к подтягивающим резисторам внешнее питание через разъем XS1 и диод VD2.

Цифровой выход реализован на специализированной микросхеме управляемого коммутатора нагрузки DA1. Микросхема содержит ключ на полевом транзисторе, схему защиты по превышению тока нагрузки и защиты от перегрева. Также имеется выход диагностики, позволяющий определять простейшие неисправности: обрыв или короткое замыкание нагрузки.

Конструктивно модуль АЮ14 реализован на двусторонней печатной плате (рис. 3). На одной стороне платы смонтированы клеммы для подключения к токовой петле и внешним датчикам, основные электронные компоненты смонтированы на второй стороне печатной платы.

Рис. 3. Приемопередатчик АЮ14

Рис. 4. Зависимость погрешности измерения силы тока от температуры в режиме передатчика

3. Характеристики модуля АЮ14

В таблице 1 приведены основные технические характеристики модуля АЮ14. С целью определения погрешности измерения тока были проведены испытания модуля АЮ14 в термокамере при температуре от -40 до $+80^{\circ}\text{C}$. Результаты испытаний, полученные при работе

Таблица 1. Характеристики модуля АЮ14

Интерфейс с сенсорным узлом	I2C (BotikBus)
Число каналов АЦП 1	
Разрешение преобразования ток-код	$\leq 0.97 \text{ мкА/бит}$
Диапазон измерений тока	$2.4 \div 31.3 \text{ мА}$
Режим работы АЦП	циклический
Частота дискретизации	13.5 Гц
Динамическое входное сопротивление	$\leq 55 \text{ ом}$
Падение напряжения при токе 20 мА	$\leq 4.6 \text{ В}$
Погрешность при $0 \div 50^\circ \text{ C}$	$\pm 0.15\%$
Погрешность при $-40 \div 85^\circ \text{ C}$	$\pm 0.4\%$
Число каналов ЦАП	1
Разрешение преобразования код-ток	$\leq 0.59 \text{ мкА/бит}$
Диапазон выдачи тока	$2.6 \div 38.3 \text{ мА}$
Погрешность при $0 \div 50^\circ \text{ C}$	$\pm 0.1\%$
Погрешность при $-40 \div 85^\circ \text{ C}$	$\pm 0.2\%$
Предельное напряжение в течение 10 мс	200 В
Предельное обратное напряжение	40 В
Гальваническая развязка интерфейса 4-20 мА в течение 1 минуты	2500 В
Питание от шины BotikBus,	$3.5 \div 30 \text{ В}$
Потребление в режиме ожидания	$\sim 1 \text{ мА}$
Потребление в активном режиме	$\leq 10 \text{ мА}$
Рабочий температурный диапазон	$-40 \div +85^\circ \text{ C}$

устройства в режиме приемника и режиме передатчика, представлены на рис. 4 и рис. 5.

Заключение

Модуль АЮ14 используется в работах ИПС им. А.К. Айламазяна РАН по созданию систем мониторинга и управления на основе Интернет-технологий [4] и реализует интерфейс «токовая петля 4–20 мА»

Рис. 5. Зависимость погрешности измерения силы тока от температуры в режиме приемника

периферийных модулей сенсорной сети, обеспечивая ввод информации от датчиков и вывод команд управления на исполнительные механизмы.

Список литературы

- [1] М. Чигарев. «Интерфейсы токовой петли», *Новости электроники*, 2010, №5, 5. ⁴⁴¹
- [2] *Loop-Powered 4mA to 20mA DAC*, URL: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD421.pdf ⁴⁴¹
- [3] А. Сааб, Ш. Томас. «Изолированный цифровой интерфейс для приемников и передатчиков токовой петли 4...20 мА», *Электронные компоненты*, 2009, №9, с. 39–42. ⁴⁴¹
- [4] Абрамов С. М., Шевчук Ю. В., Пономарев А. Ю. и др. «Сенсорная сеть с модульной архитектурой», *Программные системы: теория и приложения*, 6:4(27) (2015), с. 197–208, URL: http://psta.psiras.ru/read/psta2015_4_197-208.pdf ^{446,450}

Рекомендовал к публикации

к.т.н. Д. В. Зубов

Об авторе:

Александр Юрьевич Пономарев

Ведущий инженер ИПС им. А.К. Айламазяна РАН. Область интересов: цифровая и аналоговая схемотехника, импульсные преобразователи напряжения

e-mail:

harry@botik.ru

Пример ссылки на эту публикацию:

А. Ю. Пономарев. «Приемопередатчик интерфейса 4-20 мА», *Программные системы: теория и приложения*, 2015, **6**:4(27), с. 441–453.

URL: http://psta.psiras.ru/read/psta2015_4_441-453.pdf

A. Ponomarev. *Sensor network with module architecture*.

ABSTRACT. This article presents an industrial analog current loop (4-20 mA) device capable of acting as both receiver and transmitter. The principle of operation and implementation details are described. The device is intended for use in modular sensor networks, interfacing with sensors and/or actuators over 4-20 mA current loop. (*In Russian*).

Key Words and Phrases: sensor network, 4-20 mA current loop.

References

- [1] M. Chigarev. “Current-Loop Interfaces”, *News of Electronics*, 2010, no.5, 5 (in Russian).
- [2] *Loop-Powered 4 mA to 20 mA DAC*, URL: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD421.pdf
- [3] A. Saab, Sh. Tomas. “PWM-Controlled 4–20 mA Current-Loop Transmitter Provides Galvanic Isolation”, *Electronic Components*, 2009, no.9, pp. 39–42 (in Russian).
- [4] S. M. Abramov, Yu. V. Shevchuk, A. Yu. Ponomarev i dr. “Sensor network with module architecture”, *Program systems: theory and applications*, 6:4(27) (2015), pp. 197–208.

Sample citation of this publication:

A. Ponomarev. “Sensor network with module architecture”, *Program systems: theory and applications*, 2015, 6:4(27), pp. 441–453. (*In Russian*).

URL: http://psta.psiras.ru/read/psta2015_4_441-453.pdf