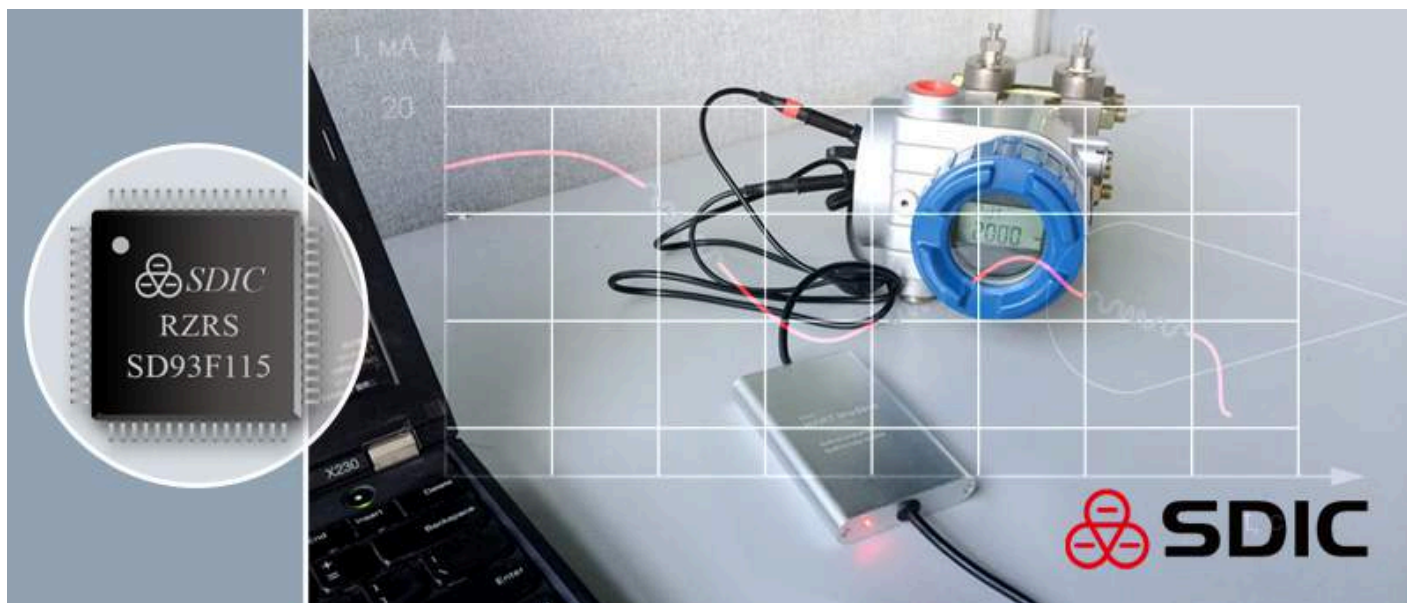


# Решения SDIC для токовой петли 4...20 мА

25 мая 2023



учёт ресурсов | автоматизация | лабораторные приборы | SDIC | статья | интегральные микросхемы | 4-20 мА | HART | ЦАП |  
токовая петля | current loop

*Константин Кузьминов (г. Заполярный)*

*Развитие стандарта HART позволяет модернизировать существующие системы и создавать новые – надежные, простые и имеющие расширяемый функционал. Компания SDIC предлагает HART-модемы SD2015, SD2017, SD2057, SD2085 и их обновленные версии SD2015B, SD2017B, а также токовый ЦАП SD2421 для преобразования цифровых данных в аналоговый сигнал интерфейса токовой петли.*

Компания **Hangzhou SDIC Microelectronics Inc. (SDIC)**, основанная в 2005 году в городе Ханчжоу (КНР), является разработчиком интегральных схем (ИС) и размещает их производство на сторонних фабриках. Основная техническая команда имеет опыт работы в аналогичных компаниях США. Непосредственно над разработкой и проектированием микросхем на данный момент трудятся 65% коллектива. Многолетний технический опыт, принесящий компании несколько патентов, в том числе и в смежных областях, и развитие бизнеса сделали SDIC одной из ведущих компаний Китая по разработке и производству высококачественных ИС для смешанных (аналоговых и цифровых) сигналов. Продукция включает в себя решения для медицины, промышленного оборудования, систем контроля и измерений, приборостроения, в том числе:

- HART-модемы и токовые ЦАП для интерфейса «токовая петля» 4...20 мА;
- 8- и 32-разрядные микроконтроллеры с высокоточными АЦП;
- специализированные ИС для метрологии;
- интегральные цифровые термодатчики.

Надежность, качество и востребованность продукции обеспечивают компании продажи более 100 млн микросхем ежегодно. SDIC стал первым массовым производителем HART-модемов и токовых ЦАП для приложений с интерфейсом «токовая петля».

Токовая петля представляет собой систему из передатчика, источника тока, проводного контура в виде петли и приемника. Передатчик, получив информацию от какого-либо сенсора, преобразует ее или в аналоговый сигнал, представляющий собой изменения тока в петле в диапазоне 4...20 мА, или в цифровой, используя границы диапазона тока в качестве логических «0» (4 мА) и «1» (20 мА). Изменение именно тока, а не напряжения позволяет использовать интерфейс в условиях сильных электромагнитных помех и на значительном расстоянии между передатчиком и приемником. При этом передатчику не требуется информация

о сопротивлении линии для поддержания необходимого значения тока, а в случае ее обрыва и передатчик, и приемник это легко обнаруживают. Помимо помехоустойчивости и возможности самодиагностики, этот интерфейс обладает и другими достоинствами:

- высокой надежностью;
- возможностью питания маломощных устройств от линии;
- экономичностью;
- легкостью обслуживания.

С развитием электронных приложений возможностей токовой петли стало недостаточно. Объемы передаваемой информации возросли, потребовалась стандартизация обмена данными между оборудованием различных производителей. В ответ на эти требования появился стандарт HART (*Highway Addressable Remote Transducer*), физический принцип которого схематично изображен на рисунке 1.

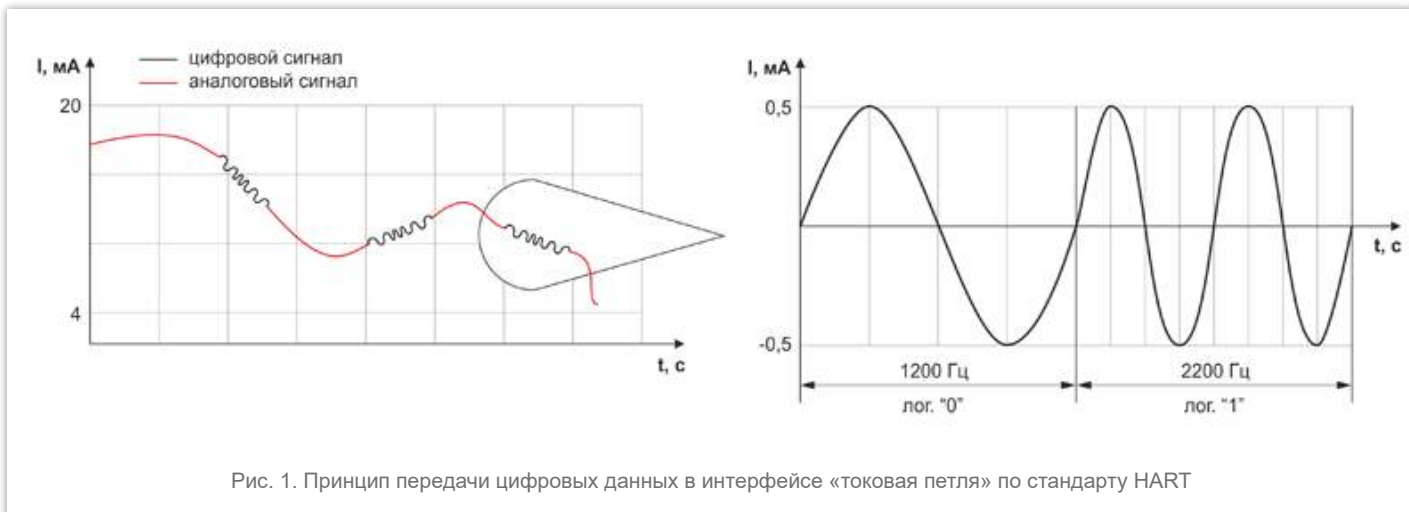


Рис. 1. Принцип передачи цифровых данных в интерфейсе «токовая петля» по стандарту HART

Стандарт HART определяет полудуплексный обмен цифровыми данными в токовой петле посредством наложения на аналоговый сигнал цифрового, кодируемого частотной манипуляцией с непрерывной фазой амплитудой  $\pm 0,5$  мА, для логических сигналов «0» и «1» используется модуляция частотой 1200 и 2200 Гц, соответственно. Использование фильтров на стороне приемника позволяет разделить цифровой и аналоговый сигналы и исключить влияние частотной модуляции на основной аналоговый сигнал 4...20 мА. Скорость передачи цифровых данных составляет 1200 бит/с, происходит обмен несколькими полями, перечисленными в таблице 1. Формат передачи одного байта изображен на рисунке 2.



Рис. 2. Формат передачи одного байта

Таблица 1. Формат сообщения протокола HART

Обозначение	Наименование	Размер, байт	Назначение
PA	Преамбула	5...20	Синхронизация приемника.
SD	Признак старта	1	Тип сообщения: ведущий ведомому, ведомый ведущему или пакет от ведомого; формат адреса: короткий или длинный; количество байт в поле EXP (для HART rev. 6).
AD	Адрес	1 или 5	Адрес ведущего размером в один бит: 1 – первый ведущий, 0 – второй; адрес ведомого: 4 бита в коротком формате адреса, 38

			бит – в длинном; признак состояния ведомого в пакетном режиме (1 бит).
EXP	Расширение	0...3	Только для HART версии 6 и выше.
CD	Команда	1	Команды для ведомого, подразделяющиеся на: универсальные, выполняемые всеми HART-устройствами; стандартные (для большинства устройств); специфичные (для конкретных устройств).
BC	Размер данных	1	Количество байтов полей ST и DT.
ST	Статус	0 (ведущий), 2 (ведомый)	Только для ведомого. Информация об ошибках связи, статусе принятой команды и статусе самого устройства.
DT	Данные	0...25	Данные. Размер поля ограничивается лишь первыми спецификациями протокола и фактически может быть до 255 байт (ограничение размером поля BC). Начиная с версии 6, первые два байта этого поля отводятся под расширенную систему команд (продолжение поля CD).
CHK	Контрольная сумма	1	Обнаружение ошибок.

Наличие адреса позволяет работать с несколькими датчиками в одной токовой петле, что значительно снижает стоимость эксплуатации, поскольку прокладывать новых линий связи не требуется. В сообщении присутствует информация о производителе электронного устройства, что дополнительно упрощает работу при монтаже и обслуживании.

Компания SDIC является производителем HART-модемов и токовых ЦАП. Первый HART-модем **SD2015** был выпущен в 2008 году, а в 2015 году появились сразу три модели: **SD2017**, **SD2057** и **SD2085**. Через три года они прошли обновление. В настоящее время **SD2015B** снимается с производства, вместо него предлагается аналогичная модель **SD2017B** в корпусе LQFP-32. Замена не требует никаких изменений в проекте печатной платы, некоторые компоненты не устанавливаются (R5, R6, R7, R8, C4 и Z1), а у некоторых изменяются значения и тип (рисунок 3):

- R1, R10 и C3 заменяются на перемычки 0 Ом;
- конденсатор C2 заменяется на резистор 200 кОм;
- резисторы R4 и R9 заменяются на конденсаторы 180 пФ и 1 мкФ, соответственно;
- значения резисторов R2 и R3 изменяются на 1,2 МОм (ранее были 3 МОм и 787 кОм);
- значение конденсатора C1 изменяется на 300 пФ (было 1000 пФ).

Основные отличия характеристик этих модемов показаны в таблице 2.

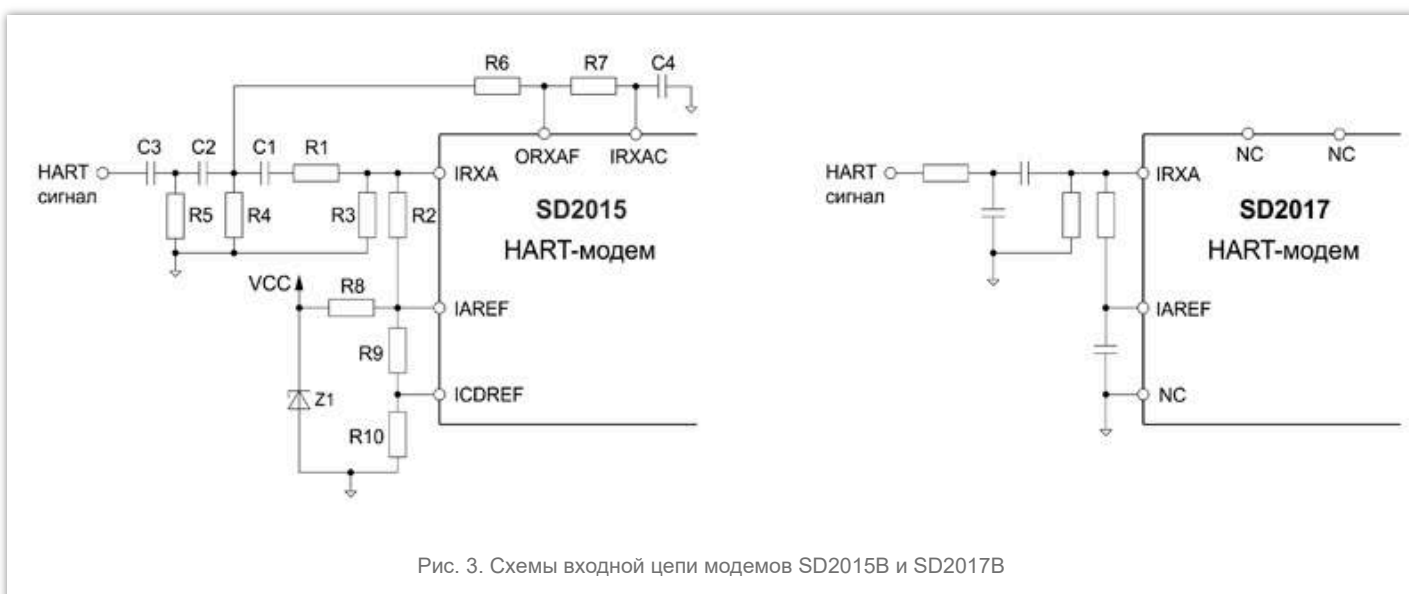
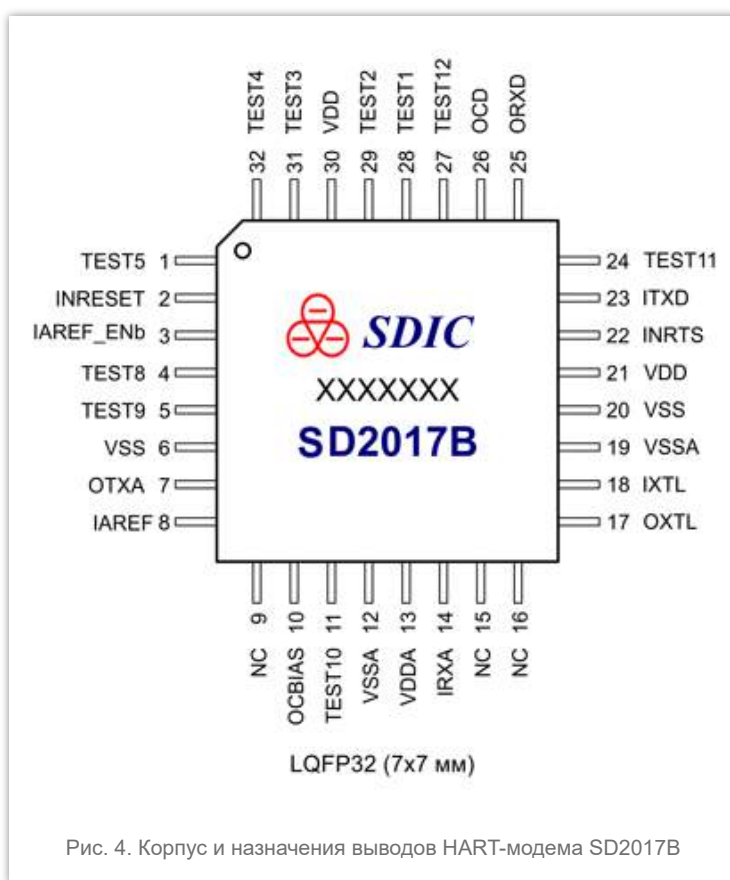


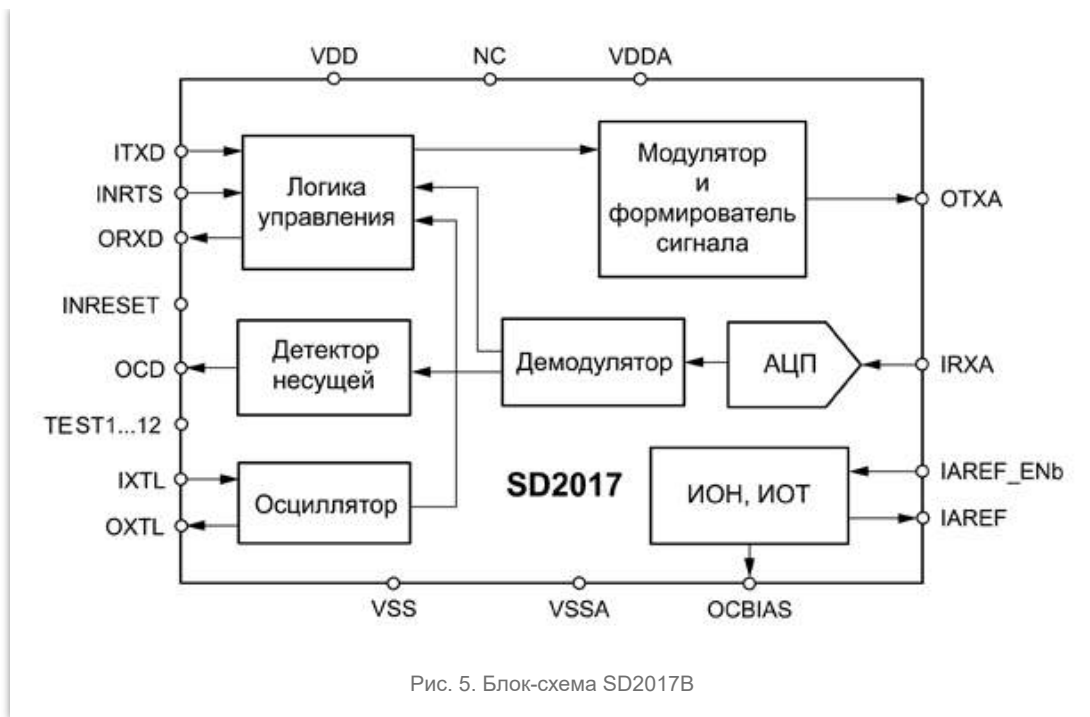
Таблица 2. Основные отличия HART-модемов SD2015B и SD2017B

Параметр	SD2015B	SD2017B
Диапазон напряжений питания, В DC	3,0...5,5	2,7...5,5
Частота, МГц	0,4608	3,6864
Диапазон рабочих температур, °С	-40...85	-55...125

HART-модемы SD2017, SD2057 и SD2085 имеют различный форм-фактор корпусов и функционал. Интегральная схема SD2017B выполнена в корпусе LQFP-32 (рисунок 4) и, за исключением вышеуказанных особенностей замены SD2015B, является полностью совместимым аналогом **HT2015** и **A5191HRT** производства других компаний: **Smar Research**, **SPRING Technology** и **ON Semiconductor**. Несмотря на большее количество, некоторые выводы не используются, например, три вывода NC (это отличает SD2017B от SD2015B). При разработке требуется обязательное подсоединение к минусу питания цифровой части (VSS) лишь трех из них: TEST5, TEST8 и TEST9. Остальные могут оставаться неподключенными либо также присоединиться к VSS.

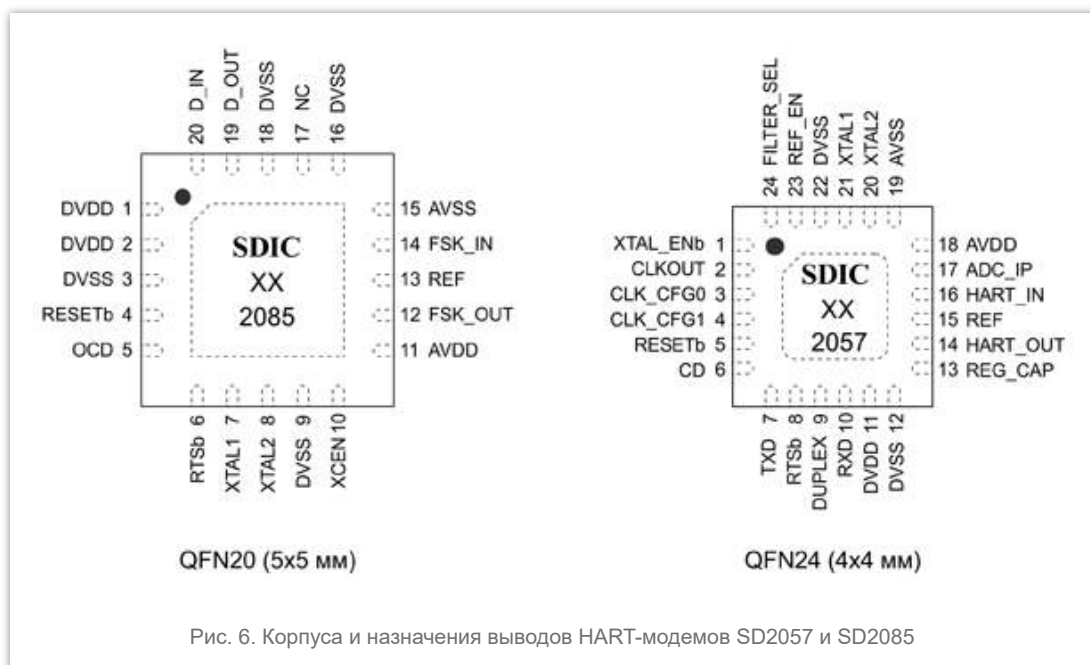


Блок-схема SD2017B показана на рисунке 5. ИС имеет два вывода IXTL и OXTL для подключения внешнего источника частоты, например, кварцевого резонатора, цифровые линии INRESET (сброс цифровой части), ITXD, ORXD, INRTS для подключения к последовательному интерфейсу (UART) и OCD – сигнал наличия несущей частоты, высокий уровень которого означает появление валидных данных в приемном буфере.



Аналоговая часть состоит из выхода модулятора для управления каскадом подключения к токовой петле и входа приемника, подключаемого ко внешним фильтрам. В SD2017B есть источник опорного напряжения 1,5 В, включаемый низким уровнем на выводе IAREF\_ENb. В случае отключения встроенного ИОН вывод IAREF должен быть подключен ко внешнему ИОН 2,5 В. Встроенный источник опорного тока имеет выход OCBIAS для подключения резистора.

ИС SD2057 и SD2085 выполнены в корпусах QFP различного размера и с разным числом выводов (рисунок 6).



Функциональность также различается, что легко заметить на блок-схеме, показанной на рисунке 7: SD2057 имеет конфигурируемый выход генератора частоты CLKOUT (3,6864, 1,8432 и 1,2288 МГц или неактивен), режим полнодуплексной работы, управление встроенным ИОН и встроенный полосовой фильтр (BPF) для входного сигнала.

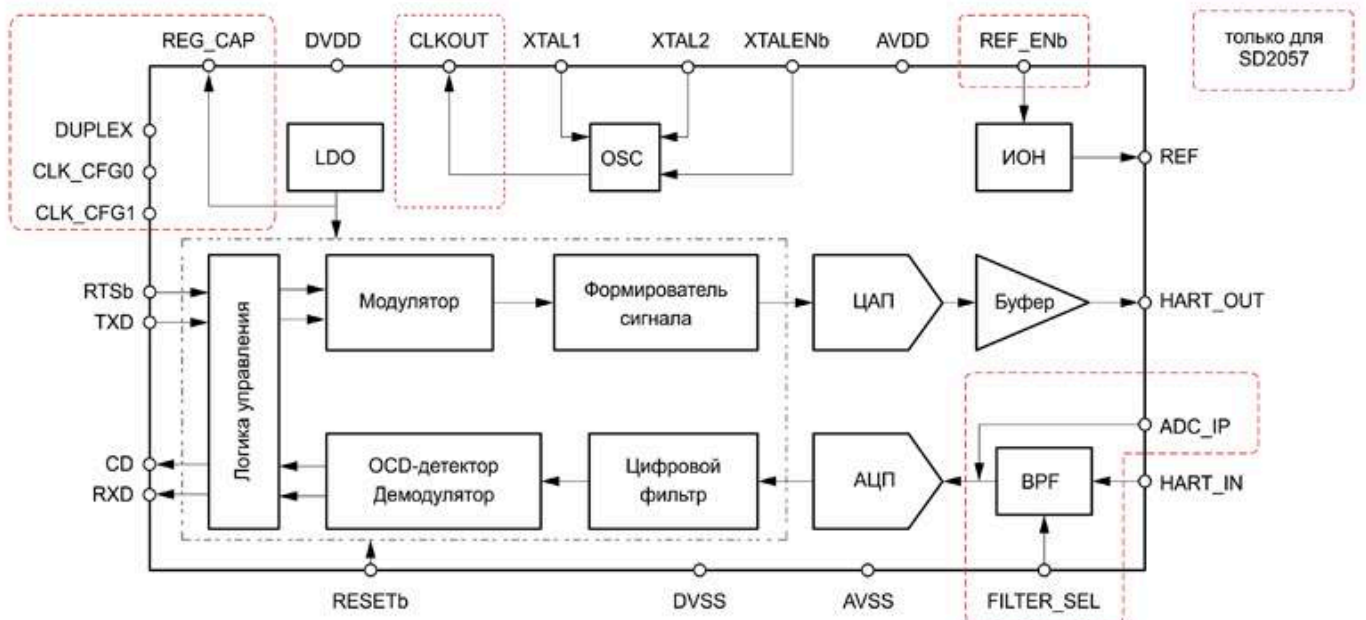


Рис. 7. Блок-схема SD2057 и SD2085

Встроенный фильтр SD2057 можно отключить при помощи низкого уровня сигнала на входе FILTER\_SEL, в этом случае входной сигнал HART должен быть подан на вход ADC\_IP. Полнодуплексный режим включается высоким уровнем сигнала на входе DUPLEX. Фактической полнодуплексной передачи не происходит, это всего лишь заставляет передатчик и приемник SD2057 работать одновременно. Такой режим позволяет отследить прохождение сигнала, получив диагностику состояния линии.

Основной функционал и методы включения HART-модемов SD2017, SD2057 и SD2085 практически идентичны, несмотря на то, что производитель использует в спецификациях различные наименования сигналов и изображения блок-схем. Различия в некоторых характеристиках приведены в таблице 3, данные указаны при напряжении питания 3,3 В и работе в диапазоне температур -55...85°C.

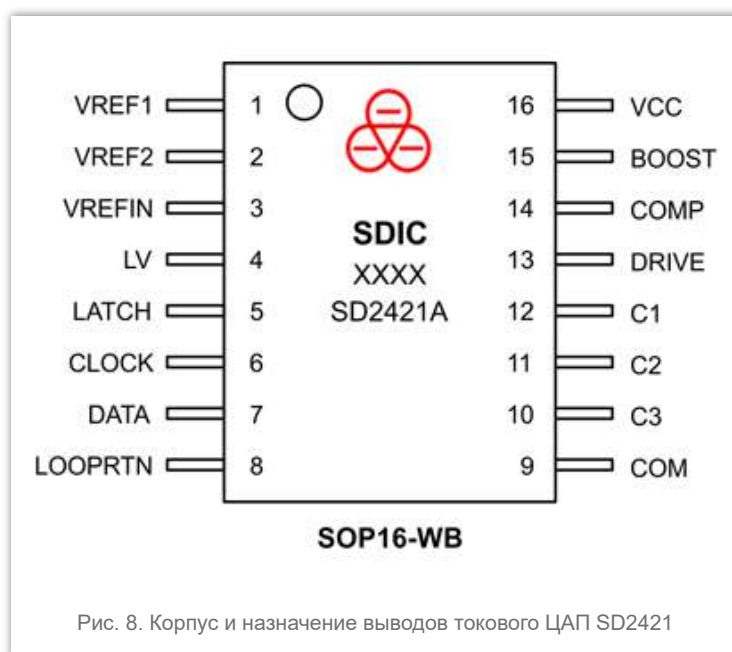
Таблица 3. Характеристики HART-модемов SD2017, SD2057 и SD2085 производства SDIC

Параметр	SD2017B	SD2057	SD2085
Диапазон напряжений питания, В DC		2,7...5,5	2,7...3,6
Номинальный ток потребления с кварцевым резонатором, мкА			
В режиме передачи	112	56	95
В режиме приема	150	93	125
Максимальное сопротивление нагрузки выхода, Ом		160	
Номинальный ток потребления от внешнего ИОН, мкА			
В режиме передачи	–	2,7	–
В режиме приема	–	3, 4	–
Внешняя частота (кварцевый резонатор или иной источник), МГц		3,6864	
Диапазон входных напряжений на входе приемника, В	0...1,5	0...1,5; 0...REF	0...1,5
Максимальный входной ток цифровых сигналов, мкА		±0,1	
Возможность использования внешнего ИОН		Да	Нет
Выход частоты, МГц	Нет	3,6864; 1,8432; 1,2288	Нет

Возможность отключения внутренней схемы генератора частоты	Нет	Да	
Встроенный полосовой фильтр	Нет	Да	Нет
Скорость передачи данных, бит/с	1200		
ESD, кВ	4		
Диапазон рабочих температур, °С	-55...125		
Корпус	LQFP-32 (7×7 мм)	QFN24 (4×4 мм)	QFN20 (5×5 мм)

Использование HART-модемов не обязательно должно иметь аналоговый сигнал. Они могут работать самостоятельно, с добавлением каскада управления источником тока в петле. При работе совместно с аналоговым сигналом возникает вопрос интеграции с токовым ЦАП. В случае ЦАП [SD2421](#) применение очень простое: достаточно подсоединить выход модема через разделительный конденсатор на один из входов ЦАП (как это будет показано далее на рисунке 10).

Токовый ЦАП SD2421 производства компании SDIC выполнен в широком корпусе SOP-16 (рисунок 8), имеет разрядность 16 бит и предназначен для преобразования цифровых данных в аналоговый сигнал интерфейса.



На рисунке 9 показана блок-схема SD2421. ИС содержит последовательный вход для цифровых данных, источники опорных напряжений и тока, сигма-дельта-ЦАП, резистивную цепь для построения RC-фильтра или подключения внешнего модулятора сигнала. Усилитель тока и регулятор напряжения обеспечивают управление аналоговым сигналом в токовой петле и питание от него ИС или всего устройства.

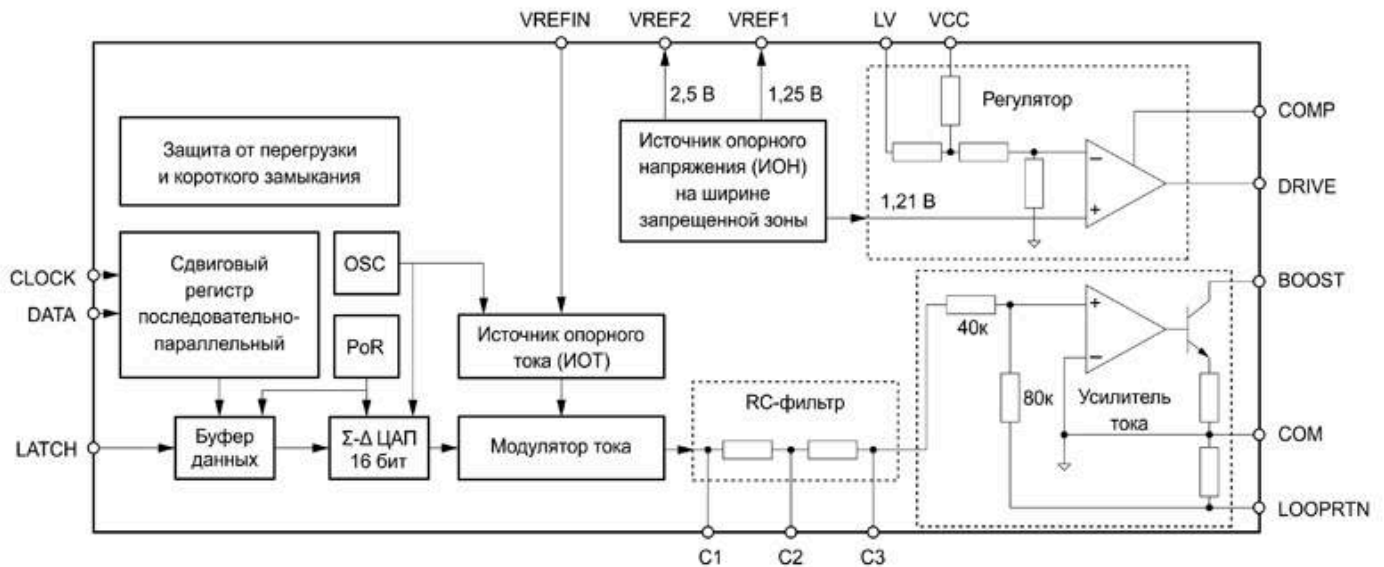


Рис. 9. Блок-схема SD2421

ЦАП имеет максимальную интегральную нелинейность  $\pm 0,01\%$ . Погрешность при токе 20 мА составляет  $\pm 0,1\%$ , при 4 мА –  $\pm 0,02\%$ . Погрешность, вносимая HART-модемами в аналоговый сигнал, значительно меньше (около 0,01%), что свидетельствует о минимальном искажении аналоговых данных при использовании цифрового обмена по стандарту HART.

#### Основные характеристики ЦАП SD2421:

- диапазон напряжений питания 2,98...5,05 В DC;
- номинальное напряжение питания 3/3,3/5 В DC;
- номинальный ток потребления при напряжении питания 3,0 В – 400 мкА;
- скорость последовательного интерфейса 3 Мбит/с;
- максимальный входной ток цифровых сигналов  $\pm 0,5$  мкА;
- минимальный выходной ток при ИОН 2,5 В – 0,5 мА;
- минимальный выходной ток при ИОН 1,25 В – 0,5 мА;
- разрешение/монотонность ЦАП 16/16 бит;
- номинальная интегральная нелинейность ЦАП 0,004 %;
- номинальный температурный дрейф ЦАП  $\pm 10$  ppm/°C;
- ESD 3,5 кВ;
- диапазон рабочих температур -40...85°C.

Типовая схема построения системы передачи данных от датчиков и микроконтроллера при помощи ЦАП SD2421 показана на рисунке 10. Наличие HART-модема для передачи только аналогового сигнала не является обязательным, он показан лишь как возможность удобной аппаратной интеграции HART с аналоговым обменом данными. В случае его отсутствия значения емкостей конденсаторов на входах C2 и C3 рекомендуется изменить на 10 нФ и 3,3 нФ, соответственно.



