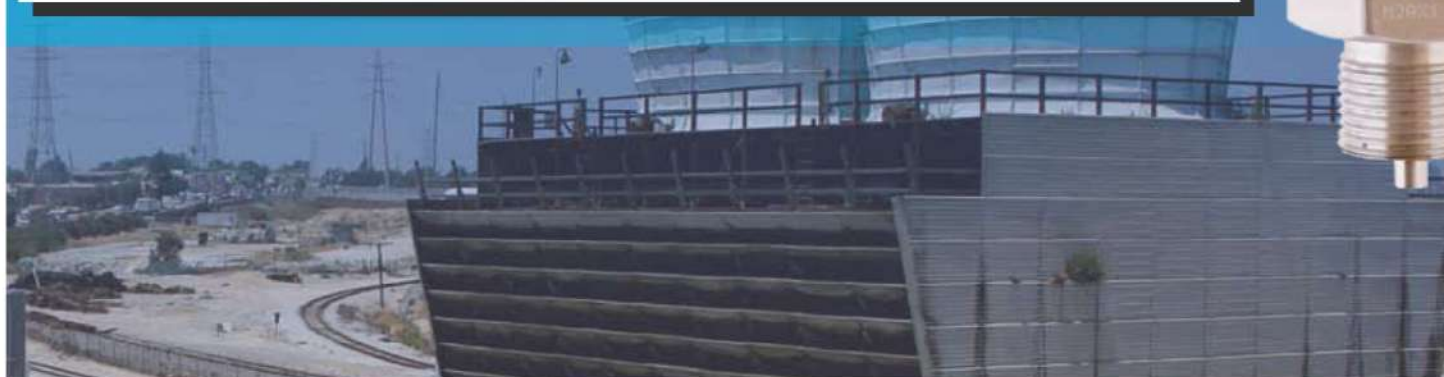
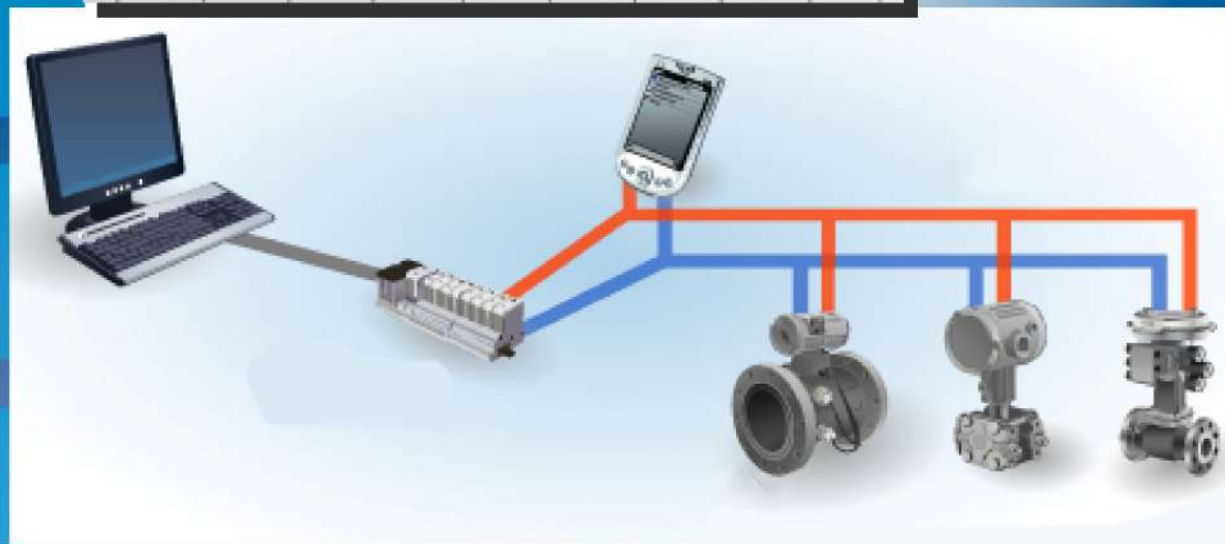
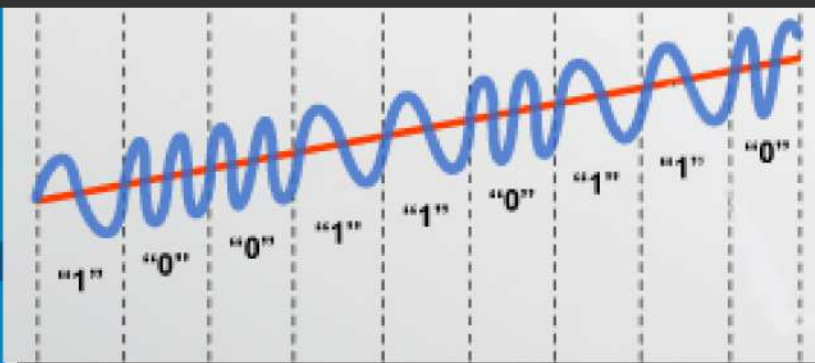


В.С. ФЕТИСОВ

ПРОТОКОЛ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА **HART** В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМАХ



В.С. ФЕТИСОВ

**ПРОТОКОЛ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА
HART
В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ
СИСТЕМАХ**

*Учебное пособие для студентов
приборостроительных направлений и специальностей
высших учебных заведений*



Уфа 2011

УДК 004.896 (07)
ББК 32.973.26-018.2 (я7)
Ф45

Фетисов, В.С.

Ф45 Протокол информационного обмена HART
в измерительных и управляющих системах : Учебное
пособие / В.С. Фетисов. – Уфа: ФОТОН, 2011. – 88 с.
ISBN 978-5-9903144-1-2

Пособие носит справочный характер и знакомит читателя с основами HART-протокола и некоторыми техническими деталями его реализации. Оно поможет понять основные особенности, преимущества и возможности этого протокола обмена информацией, который часто является основой построения интеллектуальных измерительных и управляющих систем.

Предназначено для студентов и аспирантов приборостроительных направлений и специальностей.

Табл. 24. Ил. 17. Библиогр.: 13 назв.

Научный редактор д-р техн. наук, проф. Ясовеев В.Х.

Рецензенты: научно-производственная фирма "Экситон-автоматика", г.Уфа; генеральный директор канд. техн. наук Ермолаев А.Н.;

канд. техн. наук, доцент кафедры вычислительной техники и инженерной кибернетики Уфимского государственного нефтяного технического университета Гиниятуллин В.М.

ББК 32.973.26-018.2 (я7)

ISBN 978-5-9903144-1-2

© В.С. Фетисов, 2011

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	6
Глава 1. Интеллектуальные устройства и HART-протокол.....	8
1.1. Введение.....	8
1.2. О термине "интеллектуальный"	8
1.3. Конфигураторы	10
1.4. Цифровой обмен	10
1.5. Считывание измеряемой величины в цифровом виде.....	11
1.6. Дополнительная информация	11
1.7. Многоточечные системы.....	12
1.8. HART-протокол.....	12
1.9. Универсальные команды.....	14
1.10. Общеупотребительные команды	14
1.11. Специфичные команды.....	15
1.12. Исполнительные устройства.....	16
1.13. HART-продукция.....	17
1.14. DDL.....	17
1.15. Стандарт Fieldbus	19
1.16. Фонд HART-коммуникаций.....	20
1.17. Резюме	20
Глава 2. Рассмотрение HART-сигнала на физическом уровне	22
2.1. Модель OSI.....	22
2.2. Частотно-манипулированный сигнал.....	22
2.3. Уровни сигналов.....	23
2.4. Коммуникационная петля.....	24
2.5. Активные устройства.....	25
2.6. Многоточечная схема.....	26
2.7. Требования к импедансу устройств.....	27
2.8. Ослабление и искажение сигнала. Лимит 65 мкс.....	28
2.9. Кабели связи.....	29
2.10. Заземление.....	31
2.11. Источник питания.....	32
2.12. Полоса пропускания аналогового сигнала.....	32
2.13. Исполнительные устройства.....	33

2.14. Другие устройства.....	33
2.15. Барьеры безопасности.....	33
2.16. HART с передачей сигнала по напряжению.....	34
2.17. HART на основе RS-485.....	34
2.18. Беспроводной HART – WirelessHART.....	34
2.19. Резюме.....	35

Глава 3. Процедура транзакции, кодирование

и структура сообщения	36
3.1. Взаимодействие "master – slave"	36
3.2. Процедура транзакции	36
3.3. Пакетный режим.....	37
3.4. Кодирование.....	38
3.5. Формат сообщения. Длинный и короткий форматы.....	39
3.6. Преамбула.....	40
3.7. Стартовый символ.....	40
3.8. Адрес.....	41
3.9. Командный байт.....	42
3.10. Счетчик байтов.....	42
3.11. Поле статуса.....	43
3.12. Поле данных.....	43
3.13. Контрольная сумма.....	43
3.14. Примеры транзакций.....	43
3.15. Резюме.....	46

Глава 4. Команды, данные и статус

4.1. Введение.....	47
4.2. Команды.....	47
4.3. Команды #0 и #11.....	47
4.4. Команды #1, #2 и #3 и им подобные.....	48
4.5. Команда #6.....	49
4.6. Команды #12 - #19.....	49
4.7. Данные.....	50
4.8. Нумерованные элементы списков.....	50
4.9. Многопараметрические передатчики.....	51
4.10. Сводные таблицы команд.....	52
4.11. Статусная информация.....	65
4.12. Резюме.....	70

Глава 5. DDL - язык описания устройств.....	71
5.1. Введение.....	71
5.2. Что представляет собой DDL.....	72
5.3. Преимущества DDL.....	75
5.4. Создание описания устройства.....	79
5.5. Использование описаний устройств.....	80
5.6. Распространение описаний устройств.....	80
5.7. Резюме.....	81
Рекомендуемая литература.....	83
Приложение 1. Полезные ссылки на сайты Интернета.....	84
Приложение 2. Наиболее известные производители HART-продукции.....	85
Приложение 3. Хронология версий HART-протокола.....	87

ПРЕДИСЛОВИЕ

Протокол **HART**[®] - это ставший в наши дни стандартом де-факто протокол обмена информацией с интеллектуальными средствами измерения промышленного назначения. Акроним HART образован из слов "Highway Addressable Remote Transducer", что на русский можно перевести как "удаленный преобразователь, адресуемый через информационную магистраль". Информационная магистраль физически реализуется обычно посредством двухпроводной линии, в которой традиционно может быть организован аналоговый канал передачи информации, например, с помощью непрерывного токового сигнала в стандартном диапазоне 4-20 мА. Адресация и обмен служебной информацией производятся с помощью цифровых сигналов, которые пересылаются по тому же основному каналу передачи наряду с аналоговым сигналом. Спецификация HART-протокола определяет физическую форму передачи, процедуры обмена, структуру сообщения, форматы данных и набор команд. Разработчику, однако, предоставляется некоторая свобода для определения каких-либо особых команд, специфичных для разрабатываемого нового устройства, если это необходимо.

Изначально HART-протокол был разработан фирмой Rosemount Inc. Но затем, с целью поддержки продвижения на рынок интеллектуальных промышленных приборов с цифровым обменом информацией, эта фирма передала все права на протокол так называемому Фонду HART-коммуникаций (HART Communication Foundation) (www.hartcomm.org). Сейчас использование HART-протокола свободно для всех. Все большее количество производителей приборного оборудования предлагает продукцию с его использованием (см. Прил. 2).

Это пособие знакомит читателя с основами HART-протокола и некоторыми техническими деталями его реализации. Оно поможет понять основные особенности, преимущества и возможности этого протокола. Неформальное рассмотрение большинства вопросов здесь также поможет читателю быстро разобраться в полной спецификации протокола, который периодически совершенствуется, и это обязывает разработчиков приборов и систем следить за его новыми версиями. Однако эту брошюру нельзя рассматривать как заменитель пол-

ной спецификации протокола. Здесь не содержатся абсолютно все технические подробности, поэтому это пособие нельзя рассматривать как единое и конечное руководство. Если Вы разрабатываете HART-совместимый преобразователь или систему, Вам обязательно понадобится свежая версия полной спецификации HART-протокола.

Вся техническая информация, вошедшая в пособие, взята с Интернет-сайтов фирм-производителей HART-устройств и Фонда HART-коммуникаций, а также из технического обзора: R. Bowden "HART - Field communications protocol: A Technical Overview", которое регулярно обновляется и переиздается [1].

Эту книгу лучше читать последовательно, т.к. новые понятия вводятся по мере изложения. Вначале все объясняется на простом уровне, затем рассматриваются подробности. Разделы по всем темам намеренно сделаны короткими, чтобы книгой можно было пользоваться как справочником.

Глава 1 содержит объяснение понятий интеллектуальных приборов и HART-протокола. В главе 2 описаны физические основы HART-протокола и среда передачи сигнала, в главе 3 - процедуры обмена информацией, а также кодировка символов и других данных, в главе 4 - команды управления устройствами. Глава 5 знакомит читателя с основами языка описания устройств - DDL (Device Description Language), который является важным средством обеспечения совместимости устройств.

Глава 1. Интеллектуальные устройства и HART-протокол

1.1. Введение

В этой главе читатель будет ознакомлен с основными принципами цифровых коммуникаций для работы с полевыми устройствами, такими как семейство интеллектуальных приборов Fisher-Rosemount. Под полевыми устройствами (датчиками, преобразователями, приборами, исполнительными механизмами, контроллерами) понимают устройства, удаленные от центра управления (операторской, диспетчерской), с которым они связаны информационными каналами.

1.2. О термине "интеллектуальный"

Термин "интеллектуальный" по отношению к полевым устройствам употребляется в том смысле, что они обладают неким "интеллектом", хотя на самом деле чаще всего речь идет просто о способности таких устройств перестраивать свои параметры или алгоритм своей работы и выполнять ряд дополнительных функций по команде с внешнего устройства или адаптивно в соответствии с меняющимися условиями. Фактически сейчас интеллектуальным называют любое устройство, имеющее в своем составе микропроцессор. Таким образом, термины "автоматический", "компьютеризованный", "адаптивный" во многих случаях могли бы оказаться более удачными применительно к таким устройствам [2].

В отношении средств измерений в России предпринята попытка устранить неоднозначность толкования этого термина. В 2009 г. утвержден национальный стандарт – ГОСТ Р 8.673-2009 "Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Основные термины и определения", в котором содержатся следующие трактовки: "интеллектуальный датчик - адаптивный датчик с функцией метрологического самоконтроля"; "интеллектуальная измерительная система - адаптивная измерительная система с функцией метрологического самоконтроля" [3]. Таким образом, далеко не каждое компьютеризованное средство измерений можно считать интеллектуальным, так как не в каждом из них реализован метрологический самоконтроль.

С другой стороны, бурное развитие отраслей кибернетики, объектом изучения которых является искусственный интеллект (системы

на основе нечеткой логики, искусственные нейронные сети, теория распознавания образов, теория принятия решений и т.д.), привело к созданию соответствующих измерительных и контролирующих устройств, которые часто обозначаются тем же термином - "интеллектуальные". Причем в последнем случае этот термин гораздо точнее отражает существо дела, так как устройства имитируют в той или иной степени функционирование человеческого мозга, т.е. человеческий интеллект.

Однако сложившиеся традиции трудно изменить, и в русскоязычной научно-технической литературе термин "интеллектуальные" укрепился за всеми дистанционно управляемыми и автоматическими полевыми устройствами с расширенными функциональными возможностями. Примерно то же самое наблюдается в англоязычных источниках, где для обозначения таких устройств применяется термин "smart". Поэтому далее и мы будем, следуя традиции, также употреблять это слово, причем даже без кавычек, понимая, что за этим стоит.

Итак, интеллектуальные полевые устройства имеют расширенные функциональные возможности по сравнению с беспроцессорными устройствами того же назначения. Например, интеллектуальный преобразователь может иметь повышенную точность за счет цифровых преобразований, компенсирующих нелинейность чувствительного элемента или его температурную зависимость; он может работать с большим количеством разных типов датчиков, автоматически или по команде подстраивая свои характеристики преобразования под каждый из них; такой преобразователь может иметь автоматический выбор предела измерения, адаптировать алгоритм обработки данных под меняющиеся внешние условия, выполнять полуавтоматическую калибровку. Часто в интеллектуальных устройствах бывает реализована процедура самодиагностики, что облегчает их эксплуатацию. Особенно эффективны по сравнению с обычными интеллектуальные измерительные преобразователи, реализующие совокупные или совместные измерения.

Применение интеллектуальных полевых устройств позволяет снизить требования к центральным управляющим компьютерам, а также сократить номенклатуру однородных полевых приборов до одной модели, что, несомненно, имеет положительный эффект при проектировании и производстве.

1.3. Конфигураторы

Для обеспечения описанной выше сверхфункциональности интеллектуальные устройства могут снабжаться так называемыми конфигураторами - портативными устройствами с клавиатурой и дисплеем, подключение которых к коммуникационной линии позволяет пользователю контролировать и настраивать различные устройства с HART-протоколом. Конфигураторы довольно дороги, и их использование оправдано лишь в достаточно сложных системах. В относительно простых системах управление может осуществляться с системного компьютера.

1.4. Цифровой обмен

Для того, чтобы возможно было разносить полевое устройство и конфигуратор на большие расстояния, логично было выбрать в качестве средства обмена информацией между ними последовательный цифровой код. Следующим логичным шагом был выбор в качестве физического канала обмена двухпроводной линии, как правило, уже ранее смонтированной под традиционные аналоговые информационные каналы.

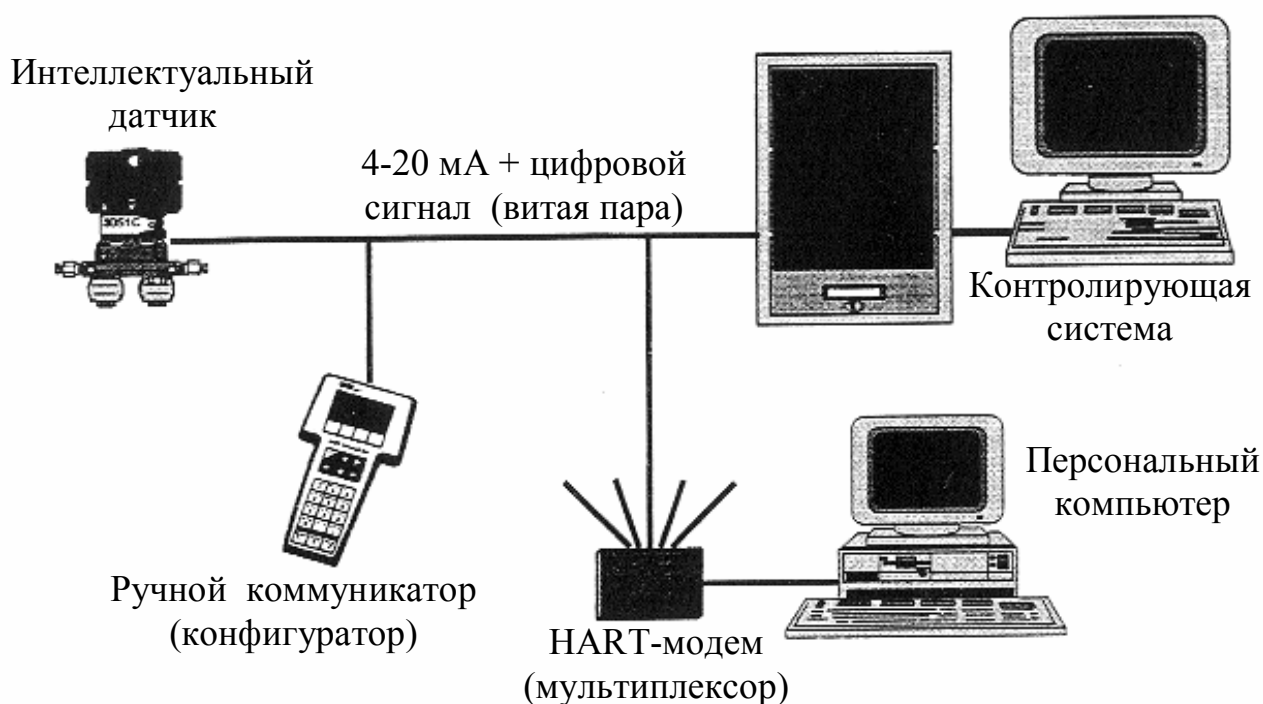


Рис.1.1. Интеллектуальная система

Так и была создана фирмой Fisher-Rosemount основная концепция интеллектуальных устройств, в которой аналоговый сигнал,

цифровые сигналы и иногда питание передаются одновременно по одной паре проводов.

В таких системах имеются все преимущества цифровых коммуникаций и, в то же время, сохраняются аналоговые каналы, требующиеся для существующих систем. Цифровой обмен используется не только для настройки и контроля устройств: он может использоваться и для передачи собственно измеряемой величины в цифровом виде. Таким образом, такое устройство может быть без особых изменений использовано в чисто цифровых системах.

1.5. Считывание измеряемой величины в цифровом виде

Возможность считывания измеряемых величин в цифровом виде позволяет одним прибором производить несколько измерений одновременно. Так, например, кориолисовый массовый расходомер может передавать в одной цифровой посылке значения скорости потока, температуры, плотности и осредненного массового расхода. Становится возможным контролировать состояние прибора в процессе измерения, шифровать и засекречивать измерения.

Есть еще одно важное преимущество таких систем по сравнению с чисто цифровыми или чисто аналоговыми: здесь не надо производить дополнительное аналого-цифровое или цифро-аналоговое преобразование при необходимости стыковок типа "цифра-аналог" или "аналог-цифра", поскольку оба типа носителя есть в готовом виде.

Следует иметь в виду, однако, что на посылку цифровых сообщений затрачивается определенное время. Это может оказаться неприемлемым для систем, требующих быстросредействующей обратной связи. В таких случаях для целей управления можно воспользоваться аналоговым сигналом. В будущем повышение скоростей обмена по цифровым шинам типа Fieldbus (см. п. 1.15), видимо, приведет к окончательному снятию этих ограничений.

1.6. Дополнительная информация

При наличии цифровых коммуникаций становится оправданным держать внутри полевого устройства некоторую дополнительную информацию, которая может быть считана по специальному запросу. Это может быть, например, номер устройства, описание измерения в специальной форме, диапазон и единицы измерения. Это может быть

также информация о самом устройстве: заводской номер, дата выпуска, дата последней поверки. Таким образом, может быть организована автоматизированная система учета поверок и других регламентных работ.

1.7. Многоточечные системы

Многоточечные системы (многоточечные коммуникации; моноканалы) - это конфигурации коммуникационных устройств, при которых несколько устройств разделяют общую коммуникационную линию, причем в каждый момент времени передачу может вести только одно устройство. Обычно в таких системах используется тот или иной механизм опроса (polling), обеспечивающий уникальную адресацию каждого устройства.

То есть каждое устройство параллельно с другими подсоединено к одной витой паре проводов, на удаленном конце которой находится запрашивающий информацию компьютер. Каждое устройство имеет свой адрес, и каждый запрос компьютера должен содержать этот адрес как часть запросного сообщения.

Такие многоточечные системы весьма экономичны в смысле разводки информационных кабелей и простоты входной интерфейсной части контролирующего устройства. Однако полный цикл опроса при большом числе опрашиваемых устройств может оказаться довольно длительным.

1.8. HART-протокол

Для того, чтобы реализовать взаимодействие различных управляющих и полевых устройств, требуется коммуникационный стандарт. Он должен включать в себя спецификации физических форм передачи сигналов, процедур обмена, структуры сообщений, форматов данных и набора команд для выполнения требуемых функций.

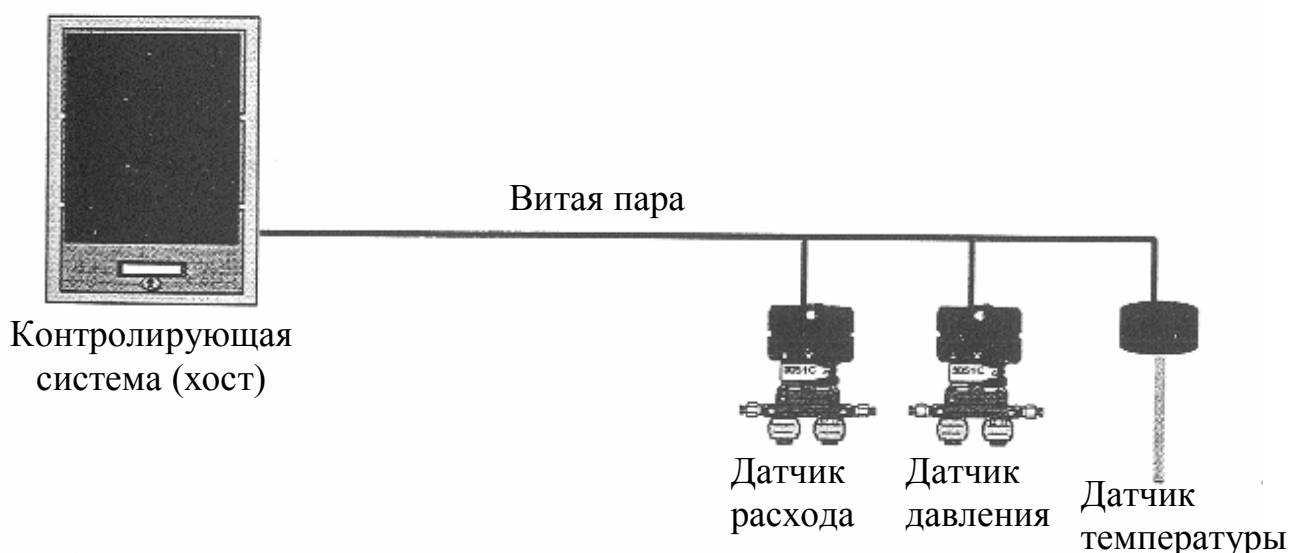


Рис.1.2. Пример многоточечной системы

В этой брошюре HART-протокол описывается детально. Если коротко, то HART включает в себя стандарт Bell 202, в котором предполагается использование частотно-манипулированного сигнала при скорости обмена 1200 бод. Этот сигнал наложен на стандартный аналоговый измерительный сигнал 4-20 мА. Средний уровень частотно-манипулированного сигнала равен нулю, поэтому он не искажает аналоговый сигнал (рис.1.3).

HART-протокол является протоколом типа "master-slave" (т.е. построен по схеме "главный-подчиненный"), и каждое полевое устройство выдает сообщения только по запросу контролирующего устройства ("master"). Контролирующих устройств может быть два (например, хост-компьютер и портативный HART-коммуникатор). К одному информационному кабелю может быть подключено до 15 зависимых устройств ("slave").

Каждое сообщение (см. рис.1.4) включает в себя, в частности, адреса источника и назначения, а также контрольную сумму для обнаружения искажений данных. Поле статуса устройства включается в каждое сообщение и служит для контроля текущего состояния устройства (а также команды или соединения). В зависимости от команды сообщение может содержать или не содержать поле данных. В секунду может совершаться 2-3 транзакции (обмена сообщениями).

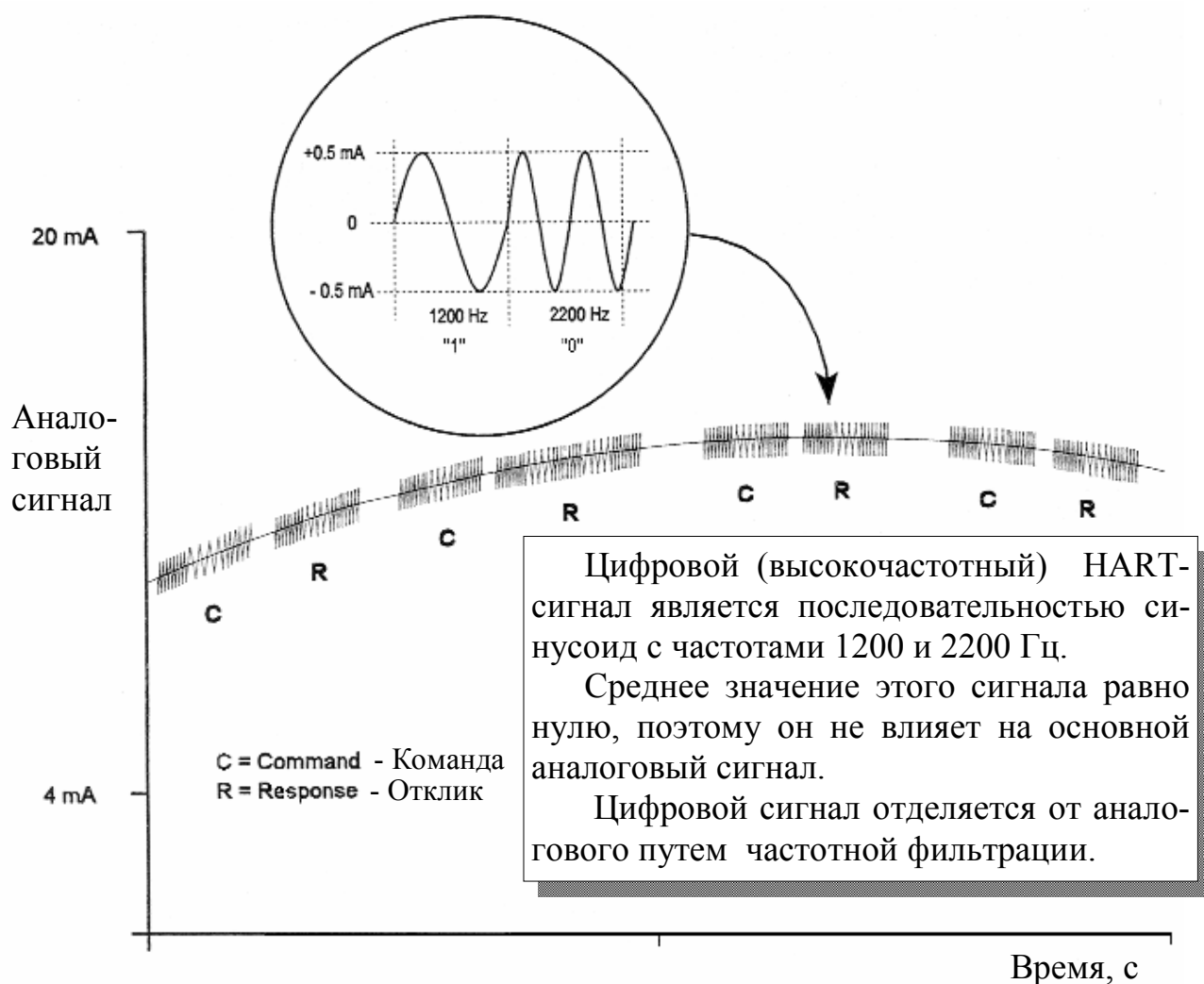


Рис.1.3. HART-сигнал

1.9. Универсальные команды

Все команды HART-протокола разделены на 3 группы. Первая группа - "универсальные", поддерживают функции, выполняемые всеми полевыми устройствами. Они представлены в табл. 1.1, а также в табл. 4.2 (более подробно).

1.10. Общеупотребительные команды

Это вторая группа команд. Они поддерживают выполнение функций многих устройств, хотя и не всех. Если устройство поддерживает определенную функцию, то такая команда приведет к ее выполнению. Команды представлены в табл. 1.2 и 4.4.

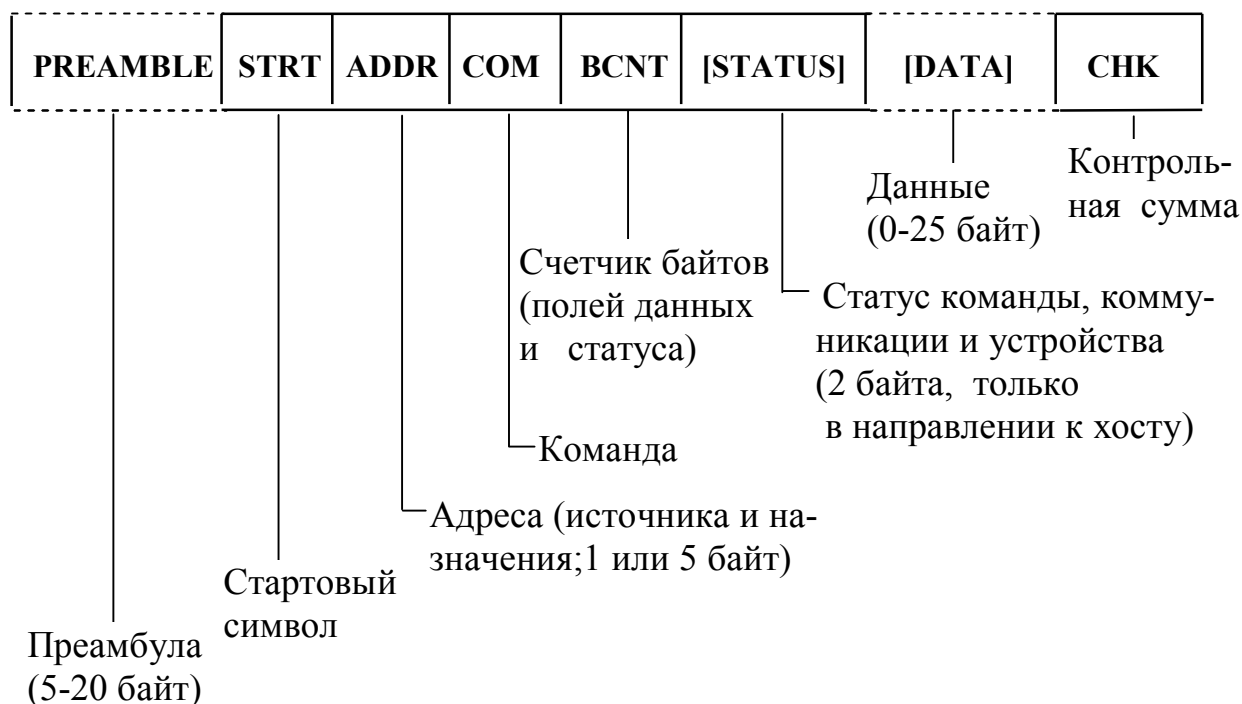


Рис.1.4. Структура HART-сообщения

1.11. Специфичные команды

Третью группу команд составляют те команды, которые поддерживают особые функции для отдельных типов полевых устройств. Некоторые примеры приведены в табл. 1.3.

Таблица 1.1

Примеры универсальных команд

Номер команды	Функции
0	Чтение информации об изготовителе и типе устройства
1	Чтение главной переменной и единицы измерения
2	Чтение значения токового выхода (в мА и процентах от полной шкалы))
3	Чтение до 4-х предопределенных динамических переменных
6	Запись опросного адреса
12, 17	Чтение или запись 32-символьного сообщения
13, 18	Чтение или запись 8-символьного тэга, 16-символьного дескриптора, даты - информации для уникальной идентификации объекта
14	Чтение информации о датчике главной переменной
15	Чтение массива, уточняющего выходную информацию: код функции преобразования, пределы измерения главной переменной, постоянная времени затухания переходного процесса и т.п.
16, 19	Чтение или запись номера финальной сборки устройства

Таблица 1.2

Примеры общеупотребительных команд

Номер ко-манды	Функции
33	Чтение до 4-х передаваемых переменных
34	Запись постоянной времени затухания переходного процесса
35	Запись значений границ диапазона измерения
36, 37	Установка верхней или нижней границы диапазона
40	Установка фиксированного выходного тока
41	Выполнение самодиагностики
47	Запись кода функции преобразования (квадратичная, линейная, логарифмическая и т.д.)
48	Чтение дополнительных данных о состоянии устройства
49	Запись серийного номера датчика главной переменной

Таблица 1.3

Примеры специфичных команд

Номер ко-манды	Устройство	Функции
128, 129	1151S	Чтение или запись кодов материалов конструкции
130, 131	3044C	Чтение или запись типа сенсора
138, 139	8712	Чтение или запись нижнего предельного значения расхода
146	9712	Запуск, останов или очистка счетчика
146, 147	1054A	Чтение или запись аварийной уставки
153, 154	9712	Чтение или запись калибровочного коэффициента плотности
166	3680	Запись типа источника γ -излучения

1.12. Исполнительные устройства

До сих пор мы применяли термины "интеллектуальный" и "HART" по отношению к средствам измерения и контроля. Это естественно, так как именно для них HART-протокол изначально и был разработан. Однако сейчас протокол используется и в исполнительных устройствах, таких как позиционеры задвижек трубопроводов или преобразователях "ток-давление". Преимущество таких уст-

роЙств перед обычными в том, что они могут выдавать различную диагностическую информацию о своем состоянии.

1.13. HART-продукция

Перечень продуктов с использованием HART-протокола, выпускаемых различными производителями, весьма обширен. В табл. 1.4 представлены различные группы и разновидности такой продукции. Полезную справочную информацию по этому вопросу можно найти в издании "The HART Book", публикуемом время от времени компанией GGH Marketing Communications.

1.14. DDL

DDL (Device Description Language) - язык описания устройств, используемый в HART, который позволяет разработчику детально и однозначно описать устройство, а затем считывать информацию о нем в процессе цифрового обмена. DDL включает в себя описания доступных переменных, команд и рабочих процедур, а также структуру меню, которая доступна оператору на хост-устройствах (контролирующих компьютерах или конфигуураторах).

DDL позволяет перенастроить хост на обслуживание новых устройств без переписывания программного обеспечения и организовать удобный интерфейс для работы с конкретным устройством. С помощью DDL обеспечивается взаимозаменяемость и универсальность интеллектуальных устройств, выпускаемых различными фирмами, даже при том, что конкретная реализация функций устройств может быть различной. Поэтому потребитель при построении системы может выбирать любые наиболее удобные для него устройства, не ограничиваясь номенклатурой какой-либо одной фирмы.

Простые хост-системы могут быть разработаны и без применения DDL, но они будут ограничены использованием универсальных и общеупотребительных команд, а при установке новых устройств потребуется модернизация программного обеспечения. В главе 5 приведено более детальное описание DDL.

Некоторые виды выпускаемой HART-продукции

Категория	Продукция
Полевые уст-ройства	<p>Аналитические приборы (рН-метры, кондуктомеры, анализаторы кислорода и т.п.)</p> <p>Плотномеры (кориолисовы и радиоизотопные)</p> <p>Расходомеры (дифференциальные, электромагнитные, вихревые, ультразвуковые)</p> <p>Уровнемеры (поплавковые, емкостные, гидростатические, ультразвуковые, СВЧ, импедансометрические)</p> <p>Измерители давления (абсолютного и разностного)</p> <p>Измерители температуры (на базе терморезисторов, термопар, пирометрические)</p> <p>Преобразователи "ток-давление"</p> <p>Контроллеры управления задвижками</p> <p>Процесс-контроллеры (ПИД-регуляторы и др.)</p>
Хост-устройства	<p>Распределенные управляющие системы</p> <p>Программируемые логические контроллеры</p> <p>Ручные коммутаторы (конфигураторы)</p> <p>Промышленные компьютеры</p> <p>Сумматоры потока</p> <p>Резервуарные вычислители объема жидкости</p>
Другие компоненты	<p>Модемы</p> <p>Модемные микросхемы</p> <p>Мультиплексоры</p> <p>Преобразователи протоколов</p> <p>Встроенные барьеры безопасности и репитеры</p>
Программное обеспечение	<p>Назначение программных средств:</p> <ul style="list-style-type: none"> - управление процессами; - SCADA-системы; - телеметрия; - приборная конфигурация; - калибровка; - диагностика; - поддержка обслуживания приборов

1.15. Стандарт Fieldbus

Продолжается работа над мировым стандартом цифровых высокоскоростных полевых коммуникаций, известным под названием "Fieldbus". Так же, как и HART, он разработан для низшего уровня в иерархической структуре информационно-управляющих систем, как показано на рис. 1.5. Главным стимулом разработки Fieldbus было стремление повысить скорости и объемы передаваемых данных. Основными чертами протокола являются передача питания по шине, многоточечность, встроенные функции помехозащиты. Однако совместимости с аналоговыми системами здесь уже не осталось. Предложено несколько скоростей обмена.

Сегодняшние интеллектуальные средства измерений являются частью непрерывно эволюционирующей цепочки от пневматических приборов и аналоговой электроники с выходом 4-20 мА до смешанных аналогово-цифровых коммуникаций (HART) и далее до полностью цифровых коммуникаций (Fieldbus). Это часть общего движения к более широкому использованию цифрового обмена информацией в приборах и управляющих системах.

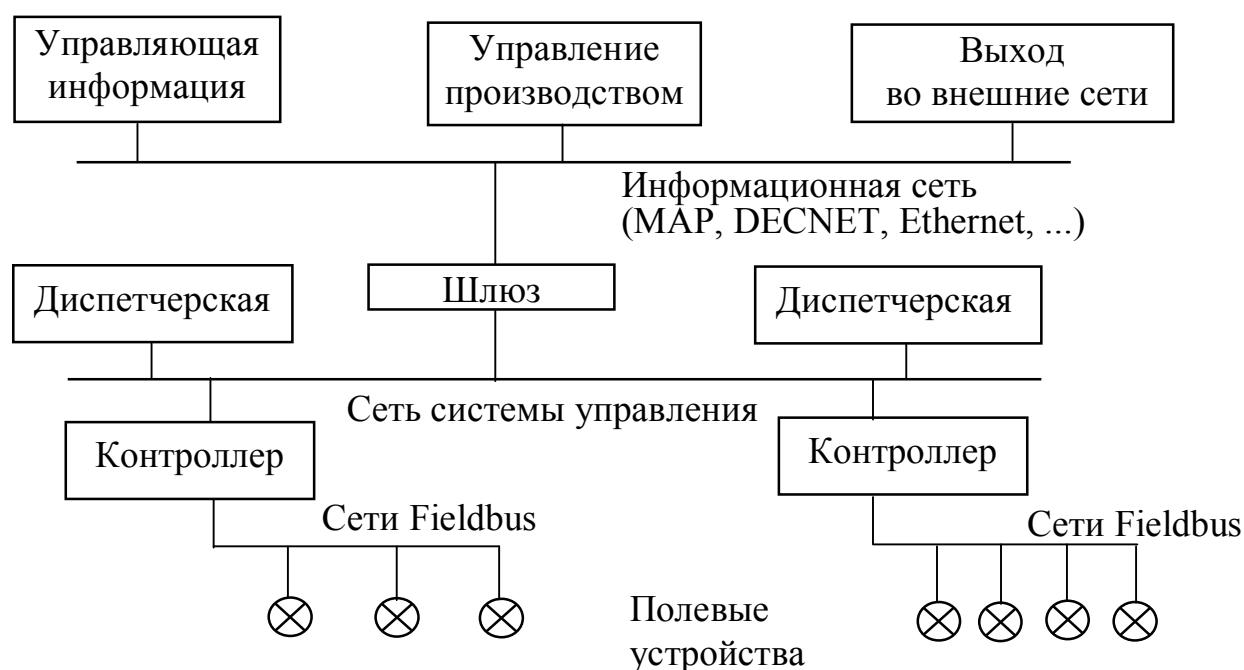


Рис.1.5. Иерархическая структура информационной сети с шиной Fieldbus

HART-протокол уже сейчас позволяет производителям и пользователям приборного оборудования использовать многие преимущества цифровых полевых коммуникаций, наработывая опыт работы с ними, и одновременно сохранять совместимость с существующими аналоговыми системами. Можно предположить, что HART-протокол просуществует довольно долго и будет существовать наряду с чисто цифровыми протоколами типа Fieldbus, находя себе применение там, где требуется модернизировать и наращивать существующие системы без радикальной их замены.

1.16. Фонд HART-коммуникаций

Фонд HART-коммуникаций (HART Communication Foundation - HCF) - это некоммерческая организация, созданная специально для продвижения и поддержки использования HART-протокола. В целях способствования более широкому внедрению HART-протокола компания Rosemount Inc. передала зарегистрированную торговую марку и все права на использование протокола Фонду HCF. Протокол остается открытым и свободным для использования всеми. Фонд HCF поддерживается его членами (их более 60). Он обеспечивает документацией, руководящими и консультативными материалами всех заинтересованных пользователей.

1.17. Резюме

В качестве итога приведем табл. 1.5, сопоставляющую основные составляющие HART-протокола и достигаемый с их помощью положительный эффект.

Таблица 1.5

Основные особенности и преимущества устройств с HART-протоколом

Особенность	Преимущество
Интеллектуальная электроника	Повышенная точность. Расширенные функциональные возможности
HART - "открытый" протокол	Потребитель не ограничен одним поставщиком
Двухпроводная система	Возможность использования существующих двухпроводных аналоговых коммуникаций

Смешанная передача аналогового и цифрового сигналов	Совместимость с существующими стандартами для аналоговых сигналов. Готовность к переходу на полностью цифровые системы
Многоточечная система	Позволяет экономить на разводке проводных цепей
Возможность управления из нескольких центров	Позволяет, например, использовать ручной коммутатор без конфликта с основным управляющим компьютером
Передача информации о состоянии устройства в каждом сообщении	Позволяет получать интегрированные данные
Дистанционная диагностика и настройка	Особо ценно для труднодоступных устройств
Расширенный поток текущих приборных данных	Подробные записи для текущего и перспективного управления
Доступ к поточным текущим диагностическим данным	Повышение производительности. Уменьшение расходов на обслуживание
Универсальные и общеупотребительные команды	Работа с новыми устройствами без проблем
Специфичные команды	Возможность вносить изменения в алгоритм работы устройств
Чтение идентификационных данных (тэга) устройства	Быстрый поиск нужного устройства в системе
Настройка исполнительных устройств	Легкий контроль петли регулирования
Стандарт Bell 202	Проверенная надежная система. Дешевые микросхемы для модемов
DDL	Взаимозаменяемость устройств от различных производителей

Глава 2. Рассмотрение HART-сигнала на физическом уровне

2.1. Модель OSI

Существует так называемая эталонная модель взаимосвязей в открытых системах - OSI (Open System Interconnection). Согласно этой модели, описание и применение коммуникационных протоколов подчиняется структурному разбиению на "слои" (уровни рассмотрения). Каждый уровень несет свою функциональную нагрузку. Соответствие разных протоколов модели OSI еще не означает их совместимости, но сильно облегчается реализация перехода от одного такого протокола к другому.

В полной модели OSI различают следующие уровни:

- 1 - физический уровень;
- 2 - уровень обмена данными;
- 3 - уровень взаимодействия сетей;
- 4 - транспортный уровень;
- 5 - уровень описания сеанса работы;
- 6 - уровень представления информации;
- 7 - уровень прикладных задач.

В протоколе HART задействованы уровни 1, 2 и 7. Остальные не являются значимыми и не рассматриваются. В этой главе рассмотрим протокол на первом, физическом уровне.

2.2. Частотно-манипулированный сигнал

В HART-протоколе используется техника частотного манипулирования для внедрения цифровых коммуникаций в токовую петлю 4-20 мА, соединяющую контролируемую систему с полевым устройством. Для представления двоичных 1 и 0 используются 1200 Гц и 2200 Гц соответственно.

Эти синусоидальные сигналы накладываются на сигнал постоянного тока (рис.1.3). Среднее значение синусоидального сигнала равно нулю, поэтому никакая постоянная составляющая более не добавляется к существующему сигналу 4-20 мА, независимо от того, какая цифровая последовательность передается. Поэтому большинство существующих аналоговых приборов продолжает работать как обычно, а для отделения цифровой высокочастотной составляющей обычно достаточно простого фильтра низких частот. Фильтрация

особенно актуальна, если в контролирующей системе используется быстродействующий АЦП.

Скорость передачи равна 1200 бод. Это значит, что двоичные цифры передаются со скоростью 1200 бит в секунду. То есть 1 представлена одним периодом синусоиды 1200 Гц, а 0 - приблизительно двумя периодами синусоиды 2200 Гц. Такой выбор частот и скоростей передачи соответствует американскому стандарту "Bell 202" - одному из нескольких используемых для передачи цифровой информации по телефонным сетям. Это значит, что можно использовать разработанные под этот стандарт дешевые и широко распространенные модемные интегральные микросхемы. В США разрешено передавать такие сигналы по телефонным сетям. К сожалению, этот стандарт не утвержден для использования в европейских телефонных сетях. (В Европе, если требуется работа через телефонные сети общего пользования, сигнал из Bell 202 требуется преобразовать в RS-232 и далее в стандарт CCITT V.22 или V.23).

2.3. Уровни сигналов

HART-протоколом установлено, что контролирующие устройства (хост-устройства) передают сигнал по напряжению, а полевые устройства - по току. Заметим, что функционирование обычного передатчика, работающего на двухпроводную линию, заключается в управлении током в петле; такой традиционный аналоговый передатчик легко дополняется компонентами, обеспечивающими генерацию небольшой высокочастотной составляющей тока HART-сигнала.

Токовый сигнал преобразуется в соответствующее напряжение с помощью нагрузочного резистора, установленного в петле последовательно с источником сигнала, поэтому все устройства используют приемные цепи, чувствительные к напряжению. Значения размаха синусоидального сигнала (удвоенная амплитуда) приведены в табл. 2.1.

В идеальном случае форма сигнала должна быть синусоидальной, но допускается и трапецеидальная форма с некоторыми ограничениями. Прямоугольная форма не допускается.

Уровни HART-сигнала

Сигнал, передаваемый хост-устройством	400..600 мВ
Сигнал, передаваемый полевым устройством	0,8 .. 1,2 мА
Минимальный сигнал полевого устройства, выделенный на нагрузке 230 Ом	184 мВ
Максимальный сигнал полевого устройства, выделенный на нагрузке 1100 Ом	1320 мВ
Требуемая чувствительность приемника	120 мВ .. 2 В
Порог чувствительности	80 мВ

В сигналах для управляемых задвижек используются такие же уровни, но полевые устройства передают сигнал не по току, а по напряжению. В этом случае импеданс полевого устройства сам является нагрузочным резистором (см. 2.13).

При назначении чувствительности приемников сделано допущение, что сигнал может быть ослаблен из-за затухания в кабеле. Порог чувствительности - это уровень, ниже которого сигналы просто игнорируются. Это уменьшает вероятность влияния наводок от внешних излучений, неидеальности заземления и питания.

2.4. Коммуникационная петля

Обычная коммуникационная цепь с передатчиком, включенным последовательно в петлю посредством двухпроводной линии, показана на рис. 2.1. Практически требуется 3 основных элемента: источник питания PSU, передатчик Tx и нагрузочный резистор RL. Они могут быть соединены в любом порядке, и заземлена может быть любая точка цепи. Сопротивление нагрузочного резистора должно быть в диапазоне 230-1100 Ом.

HART-сигнал должен индуцироваться и детектироваться в полевой петле. Источник питания для частот HART-сигнала можно считать короткозамкнутым участком, поэтому контролирующее устройство не может быть подсоединено непосредственно параллельно ему. Оно должно быть соединено либо к точкам А и В, либо параллельно резистору RL (к В и С). В последнем случае цепь замыкается через

источник питания.

Включение HART-коммуникатора в цепь не должно создавать падения постоянного напряжения в линии. Для обеспечения этого HART-коммуникатор должен включаться в цепь через конденсатор емкостью не менее 5 мкФ. Для избежания потерь ВЧ-сигнала тщательно должно быть выполнено заземление. Для уменьшения влияния этого фактора полезно выполнять гальваническую развязку коммуникатора или другого хост-устройства с петлей связи.

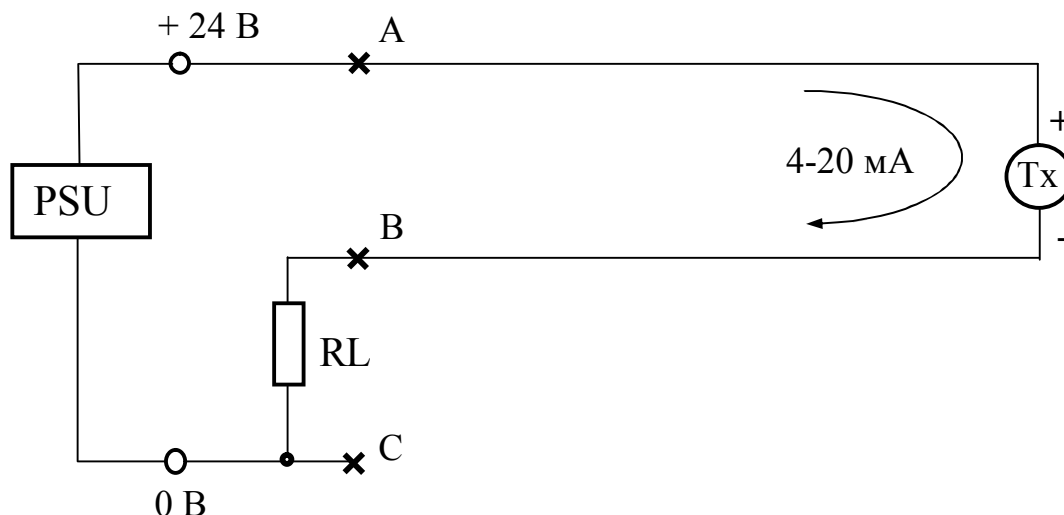


Рис. 2.1. Двухпроводная токовая петля

2.5. Активные устройства

Многие HART-устройства имеют встроенный источник питания и потому являются активными. Схема включения таких устройств показана на рис. 2.2. Здесь хост-устройства подключаются параллельно к нагрузочному резистору непосредственно или посредством двухпроводной линии.

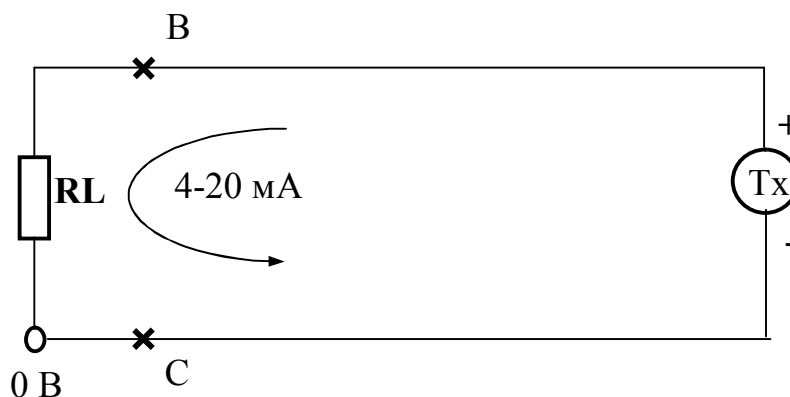


Рис. 2.2. Токовая петля с активным полевым устройством

2.6. Многоточечная схема

В каждом передаваемом HART-сообщении содержится адрес. Присвоив каждому полевому устройству свой адрес, можно параллельно подсоединить к единственной паре проводов несколько полевых устройств. Каждое из них будет принимать сообщение, адресованное только ему (или сообщения, адресованные всем одновременно). Поскольку наложение аналоговых токовых сигналов 4-20 мА при одновременном действии приведет к бессмысленному общему целому, то операция установки какого-либо опросного адреса сопровождается принудительным сбросом аналогового сигнала в нулевое состояние (4 мА). При этом минимизируется потребляемая мощность. Допускается включение в многоточечную систему до 15 устройств. На рис. 2.3 показан пример многоточечной системы с 3 устройствами.

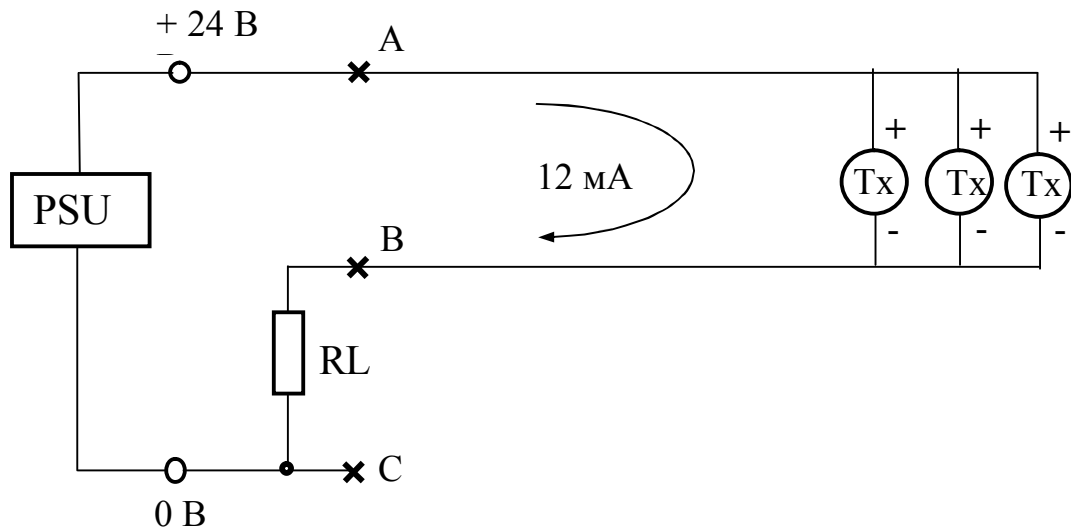


Рис. 2.3. Многоточечная схема с двухпроводной линией

Если система построена по схеме "точка - точка" (одноточечная схема с единственным полевым устройством), то основная переменная может быть считана как в аналоговом виде, так и в цифровом. В многоточечной же системе аналоговая информация недоступна и считывание основной переменной происходит только в цифровом виде.

Возможно построение многоточечных систем, в которых комбинируются пассивные и активные полевые устройства (рис. 2.4). Однако в этом случае потребуется 3-й провод в соединительной линии.

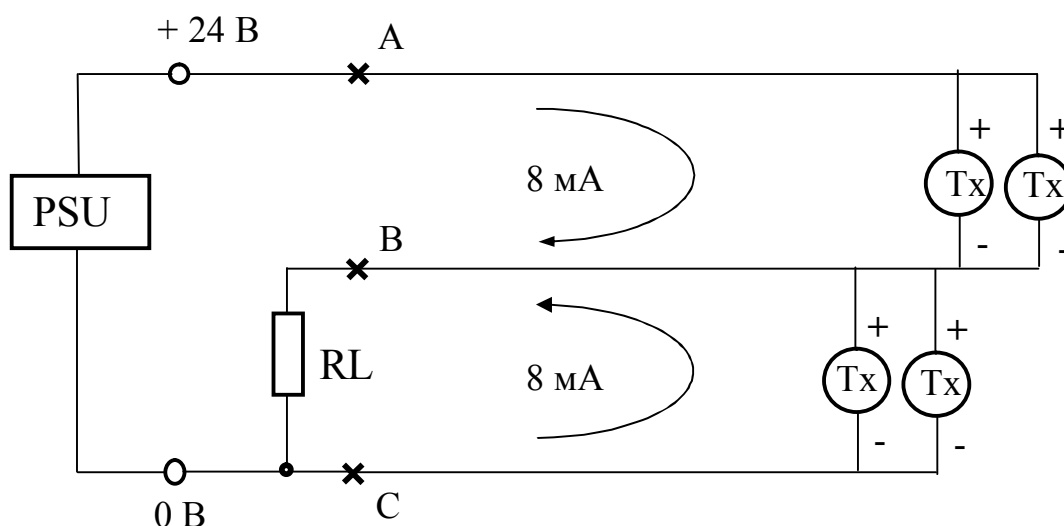


Рис. 2.4. Многоточечная система с трехпроводной линией

2.7. Требования к импедансу устройств

К импедансу любого устройства, включаемого в HART-систему, предъявляются определенные требования, перечисленные в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Требования к импедансу устройств

Главное хост-устройство (включая резистор RL) ¹	Импеданс шунта (прием)	230-1100 Ом
	Максимальный импеданс источника (передача) ²	700 Ом
Вторичное хост-устройство ¹	Минимальный импеданс шунта (прием)	5 кОм
	Максимальный импеданс источника (передача)	100 Ом
Полевое устройство	Минимальное сопротивление шунта	100 кОм
	Максимальная емкость шунта ³	5000 пФ
Другие устройства ⁴ (в совокупности)	Минимальный импеданс шунта	10 кОм
	Максимальный последовательный импеданс	100 Ом

1. Существуют также отдельные требования по индуктивной и емкостной составляющей импеданса.

2. Для главного хост-устройства импеданс источника (при передаче) должен быть не более, чем импеданс шунта (при приеме).

3. Указанный предел носит скорее рекомендательный характер. Устройства, имеющие большие значения емкости, характеризуются коэффициентом CN, который представляет собой округленную до ближайшего большего целого кратность превышения значения 5000 пФ (например, устройство с емкостью шунта 22000 пФ имеет CN=5).

4. Любые пассивные устройства в цепи, например, миллиамперметр.

Заметим, что импеданс главного хост-устройства описан в предположении, что он включает в себя нагрузочный резистор R_L . Если это не так, то импеданс хост-устройства должен быть несколько выше, чтобы удовлетворить требованиям протокола.

2.8. Ослабление и искажение сигнала. Лимит 65 мкс

Проходя через любую цепь, содержащую распределенные сопротивление и емкость, сигналы ослабляются и задерживаются (сдвигаются по фазе). Количественно степень затухания и задержки зависит от частоты сигнала и частоты среза амплитудно-частотной характеристики цепи. Для надежного выделения HART-сигнала на нагрузочном резисторе сигнал с полевого устройства не должен затухать более чем на 3 дБ (что соответствует спаду АЧХ до уровня 0,707). Предельной наихудшей комбинацией является случай, когда передаваемый токовый сигнал равен 0,8 мА, сопротивление нагрузочного резистора равно 230 Ом, и приемник имеет наименьшую чувствительность 120 мВ (табл. 2.1). Кроме того, разница задержки двух соседних частотных посылок не должна быть больше 50 мкс, в противном случае результирующая форма сигнала может быть искажена настолько, что приемник не сможет различить соседние логические сигналы.

Для соблюдения упомянутого условия HART-протоколом установлена минимальная частота среза 2500 Гц (при затухании на 3 дБ), чуть выше наибольшей из сигнальных частот HART-сигнала. Простая резистивно-емкостная цепь будет удовлетворять этому условию, если постоянная времени цепи RC будет 65 мкс или менее. Например, при $R=250$ Ом и $C=0,1$ мкФ $RC=25$ мкс, что вполне допустимо. Сопротивление R складывается из нагрузочного сопротивления и сопротивления линии, емкость C складывается из емкости кабеля и емкости параллельно подсоединенных устройств. Поэтому для достаточно большой допустимой емкости необходимо сопротивление R выбирать как можно меньше, но не менее 230 Ом. Обычно выбирают значение нагрузочного резистора 250 Ом. Если в линии последовательно включены другие устройства (миллиамперметры, самописцы, искрозащитные барьеры и т.д.), которые к тому же не шунтированы конденсаторами, то они должны учитываться при расчете значения R .

2.9. Кабели связи

Для связи с полевыми HART-устройствами на относительно коротких расстояниях (до 1500 м) можно использовать витые пары с общим экраном. При более длинных линиях связи необходимо экранировать каждую витую пару, чтобы избежать перекрестных помех. (Впрочем, при общей экранировке для защиты от перекрестных помех тоже надо предпринимать некоторые меры, а именно, - помещать в один экран пары, которые будут интерферировать в наименьшей степени. Для этого можно помещать в тот же экран и чисто аналоговые пары.).

Если кабель длиннее нескольких метров, его сопротивление и емкость могут существенно повлиять на постоянную времени RC-цепи, поэтому стоит ее проверить на соблюдение лимита в 65 мкс. Сопротивление проводов линии также может быть причиной большого падения напряжения источника питания, и это надо учитывать при расчете напряжения источника.

Электрические параметры кабеля зависят от диаметра проводника, типа и толщины изоляции. Причем речь идет об изоляции, которой непосредственно покрыты проводники, - внешняя оболочка здесь не в счет. При расчетах емкости проводников имеется в виду емкость именно отдельного проводника по отношению к другим проводникам и экрану (а не взаимная емкость пары проводов). При расчете сопротивления линии надо сложить сопротивления обоих проводов линии.

При расчете влияния длины линии на HART-сигнал желательно оперировать реальными значениями параметров, измеренными для конкретного кабеля. Однако прикидочная оценка сопротивления и емкости может быть сделана исходя из свойств диэлектриков и проводников, некоторые из которых приведены в табл. 2.3-2.4. Обычно кабели с меньшей электрической емкостью имеют более тонкие проводники и, следовательно, более высокое сопротивление. Типичные комбинации для наиболее распространенных типов кабелей приведены в табл. 2.5.

Таблица 2.3

Емкость различных кабелей

Изоляция	Емкость, пФ/м
ПВХ	300-400
полиэтилен	150-200
пенополиэтилен	75-100

Таблица 2.4

Сопротивление кабелей различного сечения

Проводники		Сопротивление (для двух проводов линии), Ом/км
Площадь, мм ²	Диаметр, мм	
2,0	1,6	17
1,3	1,3	28
0,8	1,0	45
0,5	0,8	70
0,3	0,6	110
0,2	0,5	160

Таблица 2.5

Параметры кабелей различных марок

Тип кабеля	Изоляция	Пример	Емкость, пФ/м	Сопротивле- ние, Ом/км
Приборная экрани- рованная витая па- ра	ПВХ	BS5308-2	400	24-80
	полиэтилен	BS5308-1	200	24-80
	пенополиэтилен	Kerpen 7093	100	36
Экранированный многожильный ка- бель	ПВХ	Belden 8441	270	110
Экранированная витая пара для компьютеров	полиэтилен	Belden 9873	180	75
Спец. кабель с малой емкостью (для RS-485)	полиэтилен	Belden 9729	73	160

В простейшем случае, когда имеется единственное полевое устройство и единственное хост-устройство с 250-омным нагрузочным резистором, правило соблюдения лимита 65 мкс позволяет иметь общую емкость не более 0,26 мкФ. Если допустить, что емкость устройства равна 0,01 мкФ (5000 пФ на само полевое устройство и столько же на управляющее устройство), то емкость кабеля не должна превышать 0,25 мкФ. Однако электрическое сопротивление кабеля понижает разрешенную емкость и, следовательно, длину кабеля.

Для обычного приборного кабеля сечением провода 1 мм² с полиэтиленовой изоляцией (200 пФ/м, 36 Ом/км) правило 65 мкс наложит ограничение на длину кабеля 1100 м. Используя более качественный кабель (100 пФ/м, 36 Ом/км) можно увеличить длину линии связи до 2000 м (с учетом предельной длины в соответствии с табл. 2.6). Многоточечная структура системы уменьшает возможную длину кабеля. Большое значение в этом случае играет коэффициент CN (см. 2.7), что иллюстрируется данными табл. 2.6.

Таблица 2.6

Максимальная длина для кабелей сечением 1 мм²

Полевые устройства	Изоляция		
	ПВХ	Полиэтилен	Пенополиэтилен
1 (CN=1)	600 м	1100 м	2000 м
многоточ. 10 (CN=1)	500 м	900 м	1600 м
многоточ. 10 (CN=4,4)	85 м	150 м	250 м

Примечания: Длины линий связи приведены из расчета, что сопротивление нагрузочного резистора равно 250 Ом.

Емкости кабелей взяты равными 400, 200 и 100 пФ/м соответственно для ПВХ, полиэтиленовой и пенополиэтиленовой изоляции.

2.10. Заземление

Для избежания влияния внешних наводок необходимо правильно выполнять заземление. Сигнальная цепь должна быть заземлена в одной точке. Экран кабеля также должен быть заземлен только в одной точке, и он не должен быть соединен с корпусами приборов и клеммных коробок, если последние не изолированы от земли. Эта единственная точка заземления обычно выполняется вблизи главного управляющего устройства.

2.11. Источник питания

Обычно напряжение питания приборных цепей составляет 24 В (постоянный ток). Этого напряжения должно быть достаточно для обеспечения нормальной работы полевого устройства с учетом падения напряжения на кабеле, нагрузочном резисторе и искрозащитном барьере, если последний используется. В случае аварийных ситуаций устройства могут потреблять ток до 22 мА. Это значение нужно использовать при расчетах падения напряжения на элементах цепи для наихудшего случая.

Существуют дополнительные требования для источника питания HART-сигнальной цепи; они перечислены в табл. 2.6. Требования по уровню пульсаций и шумов разработаны из условия предотвращения прямого влияния этих факторов на HART-сигнал. Ограничения по импедансу источника введены для исключения случайных перекрестных связей цепей, запитываемых от общего источника.

Таблица 2.7

Требования к источнику питания

Максимальный размах пульсаций (47 - 125 Гц)	0,2 В
Максимальный уровень шумов (500 Гц - 10 кГц), среднеквадратическое значение	1,2 мВ
Максимальный последовательный импеданс (500 Гц - 10 кГц)	10 Ом

2.12. Полоса пропускания аналогового сигнала

Для избежания взаимовлияния разных составляющих универсального HART-сигнала скорость изменения аналоговой составляющей на выходе передатчика должна быть ограничена частотой 25 Гц посредством фильтра с крутизной АЧХ 40 дБ/дек. Приемник HART должен гасить любой сигнал, который может получиться после пропускания токового меандра 16 мА через такой фильтр.

2.13. Исполнительные устройства

Для исполнительных устройств (таких как позиционеры задвижек и др.) спецификации HART-протокола учитывают разницу импедансов управляющего устройства, контроллера (master) и исполнительного устройства (slave).

В этом случае контроллер выдает токовый сигнал 4-20 мА и является высокоимпедансным устройством (по крайней мере, на постоянном токе и низких частотах). Исполнительное устройство же имеет довольно низкое сопротивление (порядка 500 Ом). В идеальном случае контроллер сохраняет свой высокий импеданс во всем частотном диапазоне HART-сигнала. При этом токовая аналоговая модуляция может быть совмещена с HART-сигналом. Исполнительное устройство как передатчик использует модуляцию по напряжению. Однако на практике многие существующие контроллеры (не HART) не отвечают указанным требованиям по импедансу, и некоторые дают сбой при появлении HART-сигнала. Они также могут генерировать быстроменяющийся аналоговый выходной сигнал, который может отрицательно влиять на цифровой HART-сигнал.

Фондом HART-коммуникаций изданы отдельные технические рекомендации по этой теме. Всегда нужно проверять совместимость исполнительных устройств и их контроллеров с HART-сигналами. Иногда может оказаться полезным использование фильтра для изоляции выходной цепи контроллера от HART-сигнала.

2.14. Другие устройства

Другие аналоговые устройства, такие как миллиамперметры или самописцы, могут быть включены в цепь, если они удовлетворяют требованиям по импедансу, перечисленным в табл. 2.2. Если самописец должен отслеживать напряжение на образцовом резисторе порядка нескольких ом, то он должен быть зашунтирован конденсатором для отвода HART-сигнала.

2.15. Барьеры безопасности

Системы со встроенными барьерами безопасности (барьерами искробезопасности) требуют особого внимания. Кроме проведения обычной проверки на падение напряжения в цепи, необходимо помнить, что максимальное напряжение, подаваемое на пассивный диодный ограничитель-барьер, должно быть на 0,6 В меньше обычного (без HART), чтобы обеспечить неискаженное пропускание HART-сигнала. Это позволит избежать открывания стабилитронов в моменты пиков сигнала. Последовательное сопротивление барьера должно быть учтено при расчете постоянной времени цепи при проверке соблюдения правила 65 мкс.

Для более сложных активных барьеров применяют другие расчетные схемы. Многие производители сейчас предлагают барьеры искрозащиты на основе повторителей-изоляторов, специально разработанных для нормального прохождения HART-сигнала.

В зависимости от эквивалентной емкости и других параметров барьера к нему может быть подключено до 4-х полевых устройств. При этом не стоит забывать, однако, о вредных свойствах распределенной емкости кабелей подключаемых устройств.

2.16. HART с передачей сигнала по напряжению

Для маломощных полевых устройств существует альтернативная физическая основа (физический слой) HART-протокола, а именно: для передачи в обоих направлениях частотно-модулированный HART-сигнал накладывается на аналоговый сигнал напряжением 1-5 В. Требования по импедансу устройств здесь, конечно, другие. Применим такой HART-протокол только для соединения устройств по схеме "точка - точка" (не для многоточечных соединений). Кроме того, ограничена длина линий связи: она составляет 150 - 330 м.

2.17. HART на основе RS-485

Некоторые фирмы (включая, например, Micro Motion) предлагают приборы, использующие структуру и формат сообщений HART-протокола на физическом слое RS-485 независимо от аналогового сигнала. Это чисто цифровой сигнал, без частотной модуляции. При наличии сбалансированной, имеющей подходящий импеданс линии связи скорости передачи могут достигать 38 400 бит/с, что позволяет с большей частотой производить отсчеты при измерениях. При скоростях, отличных от 1200 бит/с, временные соотношения для транзакций HART-протокола будут отличными от стандартных. Поддерживаются многоточечные соединения.

2.18. Беспроводной HART - WirelessHART™

WirelessHART – это введенный с 2007 года беспроводной протокол для узловой сети полевых устройств. Он добавляет беспроводные функции в протокол HART, сохраняя при этом совместимость с существующими HART-устройствами, командами и инструментами.

Сеть основана на совместимых со стандартом IEEE 802.15.4 радиопередатчиках, работающих в диапазоне 2,4 ГГц. В них использу-

ется технология широкополосного сигнала с прямой последовательностью и переключением каналов для обеспечения коммуникационной безопасности и надежности, а также технология синхронизированного многостанционного доступа с временным разделением каналов (TDMA) и контролируемой задержкой для связи между устройствами в сети. Каждое устройство в узловой сети может служить в качестве маршрутизатора для сообщений от других устройств. Иными словами, устройство не имеет необходимости обращаться напрямую к шлюзу; оно просто передает свое сообщение на ближайшее соседнее устройство. Это расширяет масштаб сети и обеспечивает избыточные каналы передачи данных для повышения надежности.

2.19. Резюме

Протоколом HART описывается частотно-манипулированный сигнал для обменов со скоростью 1200 бод, наложенный на низкочастотный аналоговый токовый сигнал 4-20 мА. Поскольку средний уровень частотно-манипулированного сигнала равен нулю, он не оказывает влияния на измерения аналогового сигнала.

Если аналоговый сигнал не требуется, то можно организовать многоточечную систему и подсоединить параллельно до 15 полевых устройств на одну пару проводов.

Уровни передаваемого сигнала и чувствительность приемника подбираются таким образом, чтобы обеспечить работоспособность при некотором затухании сигнала и в то же время уменьшить вероятность воздействия наводок и перекрестных помех.

Для исключения чрезмерного затухания и искажения HART-сигнала введено так называемое "правило 65 мкс": это ограничение на постоянную времени RC элементов системы, включая емкость и сопротивление кабеля. Кабели с малой емкостью могут иметь длину до 2000 м. Заземление кабеля должно быть только в одной точке.

HART-совместимый передатчик должен иметь ограниченный сверху частотный диапазон аналогового сигнала для исключения влияния его на цифровой HART-сигнал.

Использование искрозащитных барьеров требует специального рассмотрения на предмет совместимости с HART-сигналом.

Существуют особые разновидности HART-протокола: протокол для низковольтных устройств, протокол на физической основе RS-485, беспроводной протокол WirelessHART.

Глава 3. Процедура транзакции, кодирование и структура сообщения

Содержание этой главы соответствует рассмотрению системы на уровне 2 - уровне взаимодействия данных по модели OSI.

3.1. Взаимодействие "master - slave"

HART-протокол является одним из протоколов типа "master - slave". Это означает, что каждый обмен данными инициирует master (управляющий компьютер), а slave (полевое устройство) только отвечает, когда получает команду, адресованную ему. Этот ответ подтверждает, что запрос получен, и может содержать запрошенные данные. Допускается сразу два запрашивающих устройства, т.е., например, главный управляющий компьютер (primary master) и ручной HART-коммуникатор (secondary master). Так как адреса у них разные, то каждый из них сможет получить те данные, которые запрашивал.

3.2. Процедура транзакции

HART является полудуплексным протоколом; по окончании каждого сообщения его источник отключается, чтобы была возможна передача со стороны других источников. Установлены правила временного контроля наличия носителя частотно-манипулированных сигналов, согласно которым носитель должен включиться не позднее, чем за 5 тактовых интервалов до старта сообщения (они соответствуют преамбуле) и выключиться не ранее, чем через 5 тактовых интервалов после конца последнего байта сообщения (они соответствуют контрольной сумме).

Контроль транзакций осуществляет master. Если нет отклика на команду в течение ожидаемого промежутка времени, то master повторяет посылку. После нескольких неудачных попыток master обрывает транзакцию, считая, что slave или коммуникация неисправны.

После завершения каждой транзакции master выдерживает короткую паузу перед посылкой следующей команды, чтобы другой master при необходимости успел "врезаться" в коммуникационный обмен. Типичные длительности сообщений и задержек таковы, что возможно выполнение 2 транзакций в секунду.

В табл. 3.1 приведены некоторые упрощенные правила временного контроля транзакций.

3.3. Пакетный режим

Для достижения больших скоростей обмена данными, в некоторых полевых устройствах предусматривается опционное включение так называемого пакетного режима (burst-режим, или “пулеметный” режим). Когда этот режим включен, slave непрерывно повторяет посылку данных. Включение и выключение этого режима производится специальными командами (#107, #108, #109). Внутри этих команд содержатся и номера собственно исполняемых команд. Причем команды #1, #2, #3 должны поддерживаться обязательно, остальные - опционно. После каждой пакетной посылки вводится короткая пауза для того, чтобы master мог послать команду прекращения пакетного режима или вставки одиночной транзакции (после которой пакетный режим продолжается).

Пакетный режим применим только тогда, когда к витой паре подсоединено только одно полевое устройство. В пакетном режиме может передаваться более 3 сообщений в секунду.

Таблица 3.1

Некоторые правила временного контроля транзакций

Устройство и сообщение	Временной интервал	
Несинхронизированный primary master посылает команду через	≥ 305 мс	при непрерывном молчании на линии
Несинхронизированный secondary master посылает команду через	≥ 380 мс	
Несинхронизированный slave в пакетном режиме выдает посылку с данными через	≥ 305 мс	
Синхронизированный master посылает команду через	20* - 75 мс	после отклика другому хосту
	≥ 75 мс	после отклика на свою команду

Slave в обычном режиме (не пакетном) отвечает на команду через	0 - 256 мс	после команды
Синхронизированный slave в пакетном режиме выдает посылку с данными через	75 - 256 мс	после своей предыдущей посылки
	0 - 20 мс	после своего отклика на команду входа в пакетный режим

Примечания:

Интервалы отмеряются от конца последнего символа контрольной суммы.

В момент первого выхода на линию устройство является несинхронизированным. Оно становится синхронизированным, когда устанавливается двухсторонний обмен. Если нет отклика на команду, то устройство снова становится несинхронизированным.

* 20 мс ожидания не требуется, если отклик в пакетном режиме адресован другому хосту (устройству типа “master”).

3.4. Кодирование

NART-сообщения закодированы как последовательности 8-битных символов (байтов). Они передаются последовательно, с использованием общепринятого соглашения для UART-устройств (Universal Asynchronous Receiver / Transmitter – универсальный асинхронный приемопередатчик). При этом к байту данных добавляются еще стартовый и стоповый биты и бит контроля четности. Полная битовая последовательность показана на рис. 3.1. Младший значащий разряд D0 передается первым.

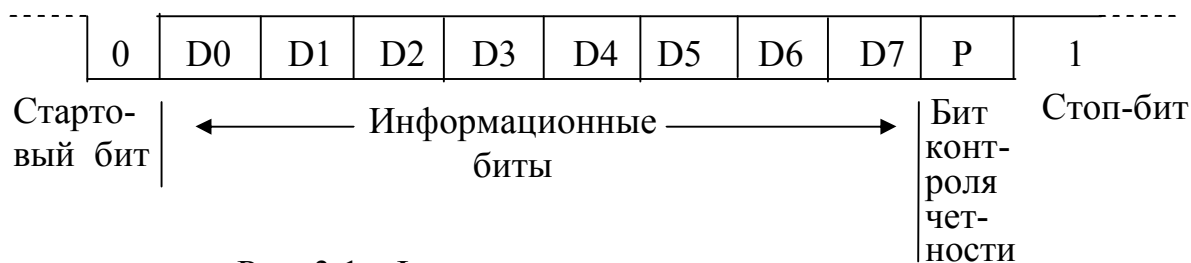


Рис. 3.1. Формат передаваемого символа

Многие средства программирования имеют специальный инструментарий для настройки последовательных портов IBM-совместимых компьютеров (в т.ч. битов стартовых, стоповых, контроля четности).

Во многих асинхронных последовательных протоколах передачи данных допускаются незаполненные промежутки между символами. В HART это недопустимо. Пробел длительностью более времени передачи 1 байта может быть распознан как ошибка.

3.5. Формат сообщения. Длинный и короткий форматы

Формат HART-сообщения был представлен на рис.1.4 (с.14). Полные примеры транзакций подробно рассмотрены в 3.14 (с.43).

Ранние версии HART (до HART Revision 4 включительно) использовали короткий формат сообщения. В этом формате адрес полевого устройства есть либо 0 (для одноточечных систем, использующих токовый сигнал 4-20 мА для измерений), либо 1-15 (для многоточечных систем). Такая короткая форма адресации известна как опросная адресация (polling).

В пятой версии HART-протокола введен так называемый длинный формат сообщений. В нем адрес полевого устройства представляет собой уникальный идентификатор - 38-битный номер, собранный из кода фирмы-производителя, кода типа устройства и заводского номера устройства. На рис. 3.5 показана структура этого номера. Этот формат более надежен, так как полевое устройство лучше защищено от возможности приема сообщений, предназначенных другим устройствам вследствие, например, внешних или перекрестных помех. Этот формат расширяет также возможности адресации в больших системах (например, он позволяет организовать общий канал радиосвязи с большим количеством удаленных полевых устройств).

Строго говоря, упомянутый уникальный идентификатор не является абсолютно уникальным, так как из 8-битного кода фирмы-производителя используется только 6 младших бит. Хотя, даже в мировом масштабе, вероятность повторения этого идентификатора очень мала - может встретиться только 4 устройства с одинаковым номером.

Большинство современных хост-устройств поддерживает как короткий, так и длинный формат сообщений. Поэтому они могут работать как со старыми, так и с новыми полевыми устройствами.

Согласно версии HART 5 (и более поздним) любые полевые устройства должны откликаться на команду #0 (Чтение уникального идентификатора). Хост (master) использует эту команду в коротком

формате при первом взаимодействии с полевым устройством, когда уникальный идентификатор еще не прочитан. Затем, получив отклик, в котором содержится и информация о возможности работы полевого устройства с длинным форматом, хост решает, в каком формате пойдет дальнейшая работа с данным полевым устройством.

3.6. Преамбула

Преамбула содержит от 5 до 20 шестнадцатеричных символов F (все единицы). Это позволяет приемнику синхронизироваться с частотой сигнала и поступающим потоком символов после обнаружения HART-сигнала, а также обеспечивает небольшую задержку, требующуюся для смены режима "прием / передача" модема после окончания команды.

Первая попытка связи должна содержать 20 символов в преамбуле; это обеспечивает наилучшую синхронизацию. В отклике на команду #0 содержится более точная информация о том, сколько символов в преамбуле достаточно для работы с данным полевым устройством.

3.7. Стартовый символ

Стартовый символ в HART-сообщении имеет одно из нескольких возможных значений. В нем содержится информация о том, какой формат сообщения используется (короткий или длинный), источник сообщения и то, является ли сообщение пакетным. В табл. 3.2 показаны возможные варианты значений стартового символа (в шестнадцатеричном формате).

Таблица 3.2

Стартовый символ

Тип сообщения	Короткий формат	Длинный формат
Master → Slave	02	82
Slave → Master	06	86
Slave → Master в пакетном режиме	01	81

Принимающие устройства воспринимают в качестве стартового тот символ, который идет сразу после преамбулы (а это по меньшей мере два FF символа). Стартовый символ полностью может быть идентифицирован содержимым битов 0, 1, 2 и 7. Предложено в последующих версиях HART-протокола использовать биты 5 и 6 для описания наличия или отсутствия дополнительных байтов между полями адреса и команды.

3.8. Адрес

Поле адреса содержит как адрес хоста, так и адрес полевого устройства. Они содержатся в единственном байте при коротком формате сообщений или в пяти байтах при длинном формате.

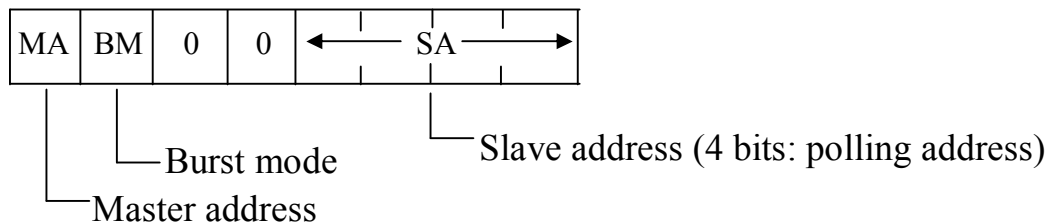


Рис.3.2. Структура адреса при коротком формате сообщения

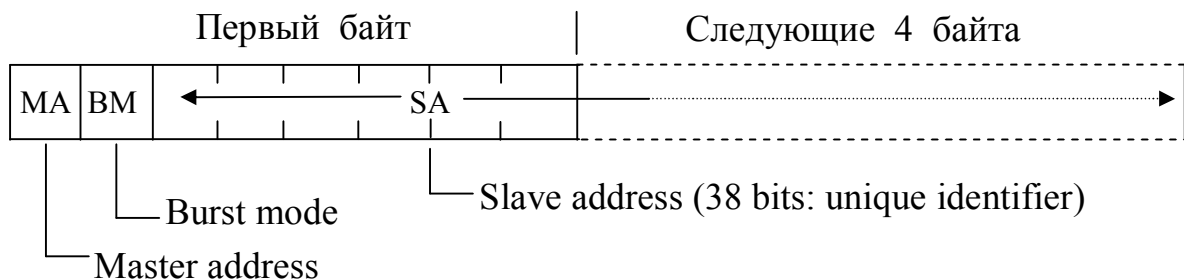


Рис.3.3. Структура адреса при длинном формате сообщения

В обоих форматах старший бит обычно является однобитовым адресом хоста. А всего может быть не более двух разных хостов (например, управляющий компьютер и ручной HART-коммуникатор). Упомянутый бит вводит различие между ними: primary master имеет адрес 1, а secondary master - 0. В пакетных сообщениях организовано по-другому: в них старший бит адреса устанавливается попере-

менно то в 0, то в 1; это дает возможность каждому из хостов прервать пакетный режим.

Также в обоих форматах следующий за старшим бит устанавливается в 1 для индикации того, что сообщение поступает с полевого устройства в пакетном режиме.

В коротком формате полевые устройства имеют опросный адрес (polling address) в диапазоне от 1 до 15. Этот номер в двоичном коде занимает 4 младших бита единственного адресного байта. В длинном формате polling address не используется. Вместо него используются 38 бит пятибайтного поля адреса, занимаемых под уникальный идентификатор полевого устройства. На рис.3.2 и 3.3 показаны две описанные структуры адресации.

В длинном формате адрес 0 (38 бит, заполненных нулями) может быть использован как "широковещательный" адрес для сообщений, адресованных всем полевым устройствам. Это возможно только в том случае, если данные в сообщении определяют, какое полевое устройство должно ответить. Например, при подаче команды #11 (Чтение уникального идентификатора, ассоциированного с тэгом) обычно используют адрес 0 и записывают тэг в поле данных. В итоге получают сообщение с командой все полевые устройства, а отвечает только то, которое соответствует переданному значению тэга.

3.9. Командный байт

Командный байт содержит целочисленную переменную (0 - FD в шестнадцатеричном представлении или 0 - 253 в десятичном), сопоставляемую с одной из команд. Это закодированное значение повторяется затем в отклике полевого устройства. В главе 4 даны подробные сведения по командам.

3.10. Счетчик байтов

Следующее поле в структуре - счетчик байтов. Это поле занимает 1 байт, куда записывается целое число, показывающее количество оставшихся байтов, формирующих сообщение (т.е. секцию статуса и данных; байт контрольной суммы сюда не входит). Приемное устройство использует это число для идентификации байта контрольной суммы и для определения момента конца сообщения. Так как поле данных ограничено по максимуму 25 байтами, то значение, содержащееся в счетчике байтов, может быть от 0 до 27.

3.11. Поле статуса

Статус (или "код ответа") включается только в ответное сообщение от полевого устройства. Он записывается в 2 байта и содержит информацию об ошибках коммуникации, статусе принятой команды (например, о том, что устройство занято, команда не распознана и т.п.) и текущем состоянии полевого устройства. Кодирование статусной информации описано далее в 4.14.

3.12. Поле данных

Не все команды или отклики на них содержат данные. Те, которые их содержат, должны соответствовать общим правилам по временному ограничению транзакций, а это значит, что размер поля данных не должен превышать 25 байт (нарушение этого ограничения допустимо лишь для HART RS-485, поскольку там используются более высокие скорости коммуникаций).

Данные могут быть в форме целых чисел, чисел с плавающей точкой или символов ASCII. Количество байтов данных и формат их представления описываются для каждой команды индивидуально.

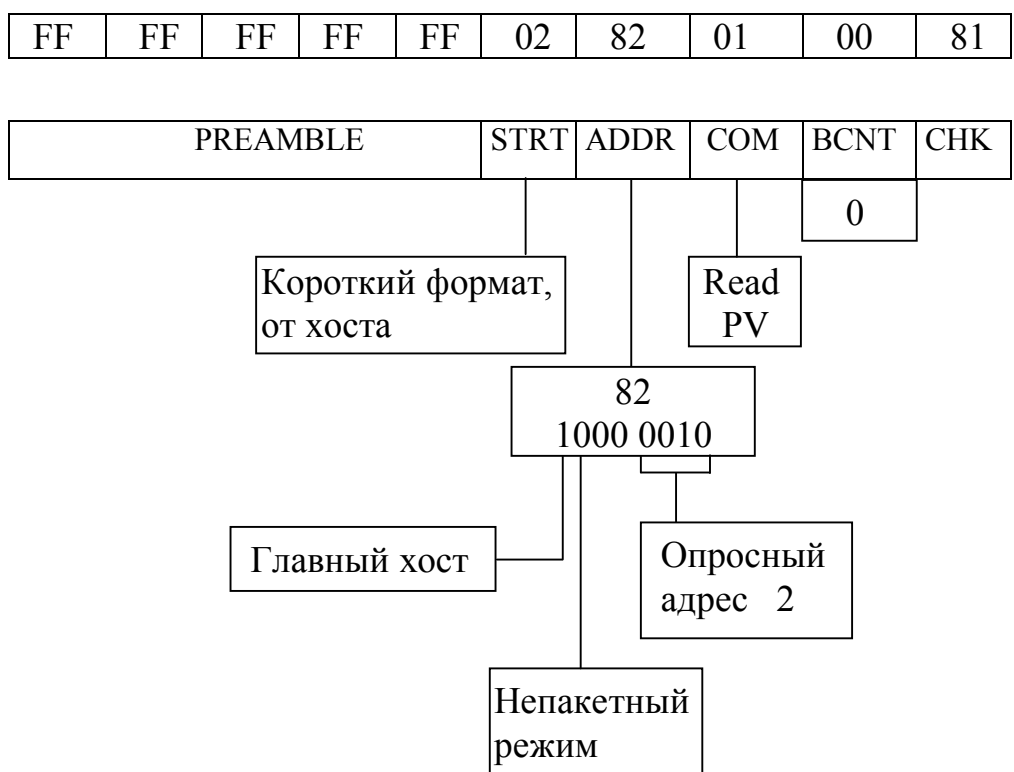
3.13. Контрольная сумма

Байт контрольной суммы содержит результат побитной операции "Исключающее ИЛИ" (XOR) над всеми байтами сообщения начиная со стартового символа. Тем самым, наряду с проверкой четности в каждом байте, обеспечивается контроль целостности передачи. Такая комбинация контрольных операций гарантирует обнаружение до 3-х "испорченных" битов в сообщении.

3.14. Примеры транзакций

На рис. 3.4 и 3.5 показаны примеры транзакций для короткого и длинного форматов соответственно с объяснением содержимого каждого поля. Значения байтов показаны в шестнадцатеричном виде, а поля адресов, кроме того, дополнительно разбиты на двоичные ряды.

От хоста к полевому устройству:



От полевого устройства к хосту:

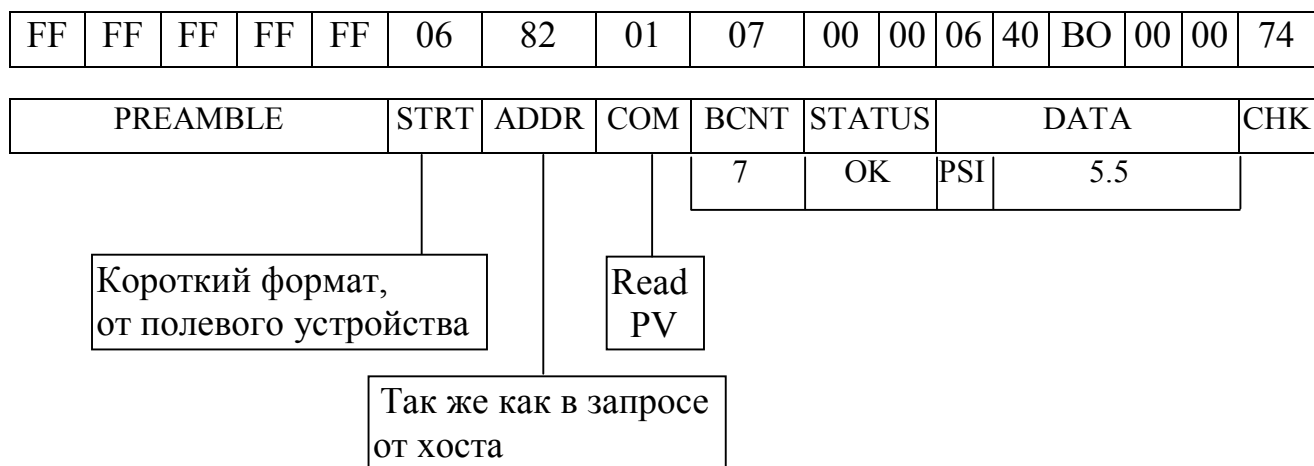
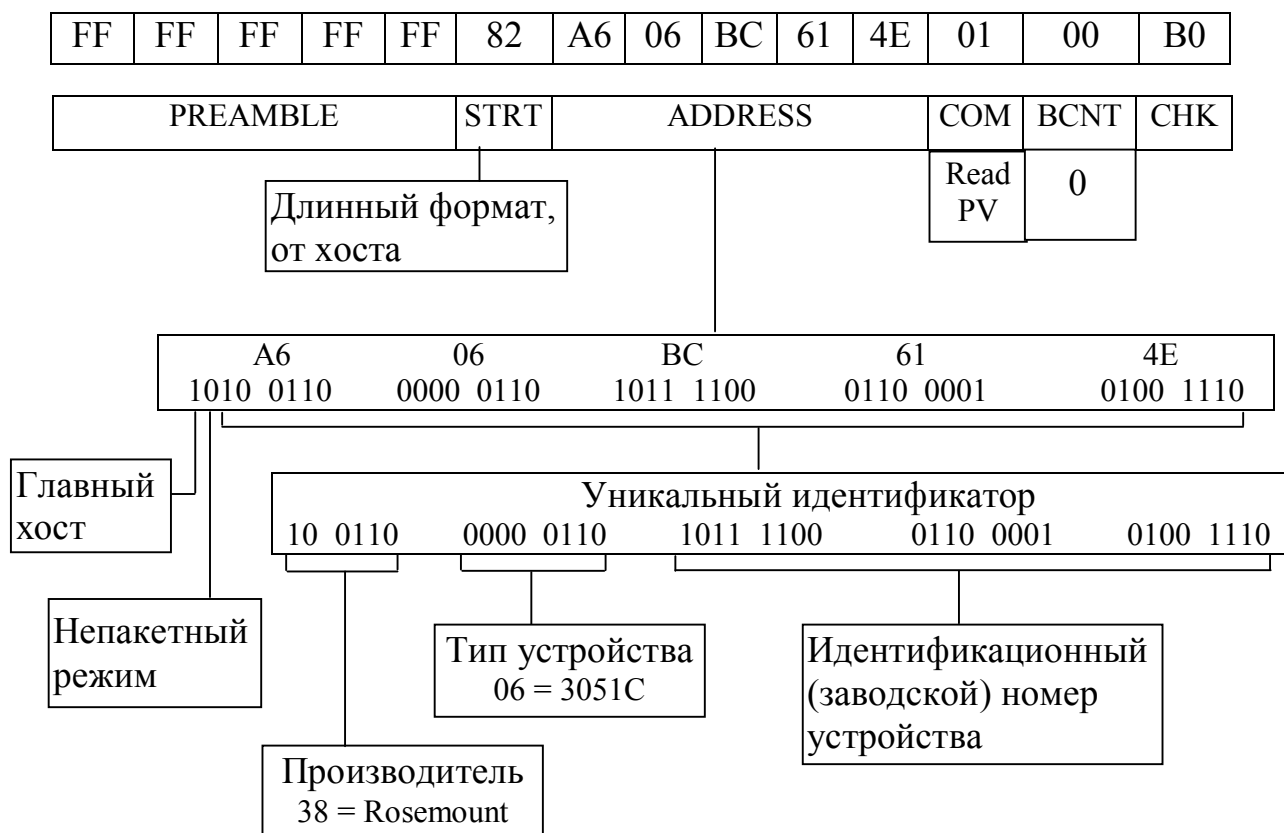


Рис. 3.4. Пример транзакции короткого формата

От хоста к полевому устройству:



От полевого устройства к хосту:

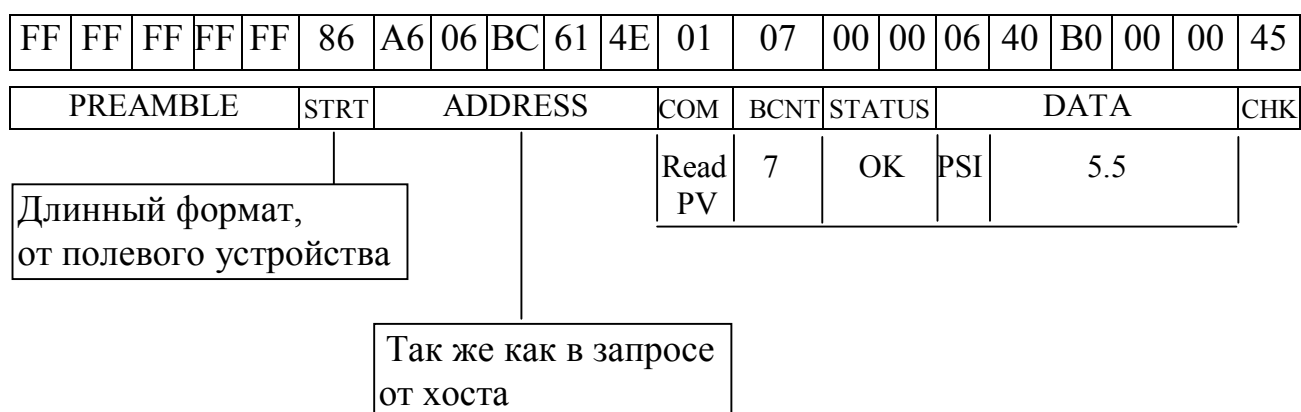


Рис. 3.5. Пример транзакции длинного формата

3.15. Резюме

NART является протоколом, построенным по схеме "master - slave".

Допускается до двух активных хост-устройств.

Каждое сообщение содержит адреса назначения и источника.

Существует две формы адресации полевого устройства: короткая форма (для старых устройств и начальной идентификации устройства) и длинная форма, основанная на специальном коде уникальной идентификации.

В каждый отклик полевого устройства включается статусная информация, индицирующая состояние устройства.

Контроль четности в байтах и вычисление контрольной суммы сообщения помогают обнаружить искажения информации.

Каждую секунду выполняется 2 транзакции. В пакетном режиме посылается 3 сообщения в секунду.

Глава 4. Команды, данные и статус

4.1. Введение

В этой главе дается классификация HART-команд и детализация структур данных, соответствующих им. Описывается также кодировка и значение статусной информации. Это соответствует уровню 7 - уровню приложений - согласно модели OSI.

4.2. Команды

Командный байт содержит целое число (от 0 до 253_{10} или FD_{16}), представляющее собой номер одной из команд HART. Некоторые номера команд (31, 127, 254 и 255) зарезервированы. Команда "254" может стать основой механизма расширения, если в будущем понадобится большее количество команд.

HART-команды распределены по трем группам: универсальные, общеупотребительные и специфичные.

Универсальные команды имеют номера от 0 до 30, общеупотребительные - от 32 до 126 и специфичные - от 128 до 253. Примеры команд приводились в табл. 1.1-1.3. Более подробное описание можно найти в табл. 4.2-4.4. Там не описывается только группа специфичных команд. Для ознакомления с такими командами необходимо ознакомиться с фирменной документацией производителя конкретного устройства.

Общеупотребительные команды #123 и #126 являются доступными только для производителей устройств. Обычно они используются в процессе сборки и настройки для сохранения информации, идентифицирующей устройство, - например, идентификационного номера, который затем уже не может изменяться пользователями. Часто для активации таких команд требуется ввод пароля.

4.3. Команды #0 и #11

Команды #0 и #11 используются для идентификации полевого устройства. Начиная с 5-й версии HART все команды имеют длинный формат представления данных, но команда #0 всегда воспринимается в коротком формате. Это позволяет HART-мастеру (хосту) идентифицировать неизвестное полевое устройство без прочтения его уникального идентификационного номера. Данные в ответе на команду

#0 содержат код производителя, код типа устройства (присвоенный производителем) и идентификационный номер устройства (ID). Из этой информации мастер сам строит уникальный идентификационный номер для его последующего использования в командах длинного формата.

Обратившись к табл. 4.2 и 4.3, можно увидеть разницу в структурах данных команды #0 для разных версий HART-протокола. Так, в версии 4 так называемый "код типа передатчика" опционно разбивается на 2 байта: код производителя и код типа устройства. Если в первом байте данных записано число "254" ("расширение"), то последующие байты разбиваются на 2 группы. В версии 5 такое разбиение обязательно. Кроме того, заводской номер устройства (номер финальной сборки) заменен идентификационным номером (ID).

Все хосты должны уметь работать во всех перечисленных случаях, если от них требуется гибкая работа с любыми версиями HART (версиями 5, 4 и более ранними). В последующих версиях HART-протокола предполагается добавить еще несколько байт данных в отклики на эту команду для более детальной спецификации.

Обычно хост начинает коммуникационный обмен с команды #0, с поллинг-адресом 0; затем адреса сканируются от 1 до 15, если предусмотрена многоточечная работа. Если полевое устройство поддерживает версию 5 или более позднюю, и тэги подсоединяемых устройств уже известны, хост может использовать команду #11 с длинноформатным адресом со всеми нулями и с тэгом, совпадающим с данными в команде. Полевое устройство будет отвечать только в случае совпадения его собственного тэга с указанным. Данные в ответе на команду #11 идентичны таковым для команды #0, и мастер также может собрать уникальный идентификационный номер устройства для его последующего использования в командах длинного формата.

4.4. Команды #1, #2 и #3 и им подобные

Эти команды предназначены для чтения измеренных переменных в различных формах. Команды #2 и #3 инициируют выдачу полевым устройством значения выходного тока в миллиамперах. Это значение совпадает с главной (первичной) переменной (PV), но только в том случае, если оно находится в пределах установленного диапазона и не индицируется ошибка переполнения, и при этом устрой-

ство не находится в многоточечном режиме, когда уровень сигнала фиксирован на уровне 4 мА.

Главная переменная PV и другие динамические переменные, возвращаемые по этим командам, не ограничены установленным диапазоном измерения и могут продолжать изменяться в пределах, допустимых для датчика. Поэтому, например, текущее относительное значение (в процентах от диапазона), возвращаемое командой #2, может принимать значения ниже 0% и выше 100%.

Команда #61 эквивалентна команде #3, она предназначена для работы с приборами, имеющими аналоговую выходную величину, отличную от тока.

По команде #110 также возвращаются динамические переменные, но без значения уровня аналогового выхода.

Аналогичная команда #33 позволяет выбрать до 4-х интересующих переменных.

Для многопараметрических устройств (со множеством выходов) команда #60 позволяет считывать какой-либо один выбранный аналоговый сигнал (и его процент от диапазона), а команда #62 обеспечивает выбор и считывание интересующей совокупности из 4-х аналоговых выходов.

4.5. Команда #6

Команда #6 устанавливает опросный адрес полевого устройства. Если он установлен в 0, устройство нормально работает в режиме "точка-точка", генерируя аналоговый выходной сигнал. Если этот адрес имеет значение от 1 до 15, система работает в многоточечном режиме и выходной ток полевого устройства фиксируется на уровне 4 мА.

4.6. Команды #12 - #19

Эти команды служат для чтения или записи различной уточняющей информации (статических данных). Детально они описаны в табл. 4.2. В четвертой и более ранних версиях HART этих команд вообще не существовало. Их функции выполняли команды #4 и #5 (см. табл. 4.3), в которых кроме команды указывается еще номер блока интересующей информации.

4.7. Данные

Не все команды и отклики на них содержат данные. Для тех же, которые содержат данные, резервируется до 25 байт (впрочем, в новых версиях HART-протокола его разработчики обещают обойти это ограничение). Данными могут являться:

- целые числа: 8-, 16-, 24- или 32-разрядные;
- числа с плавающей точкой одинарной точности (в формате IEEE 754), которые имеют структуру вида:

SEEEEEEE	EMMMMMMM	MMMMMMMM	MMMMMMMM
----------	----------	----------	----------

где S - бит знака числа (1 - минус, 0 - плюс), E - биты экспоненты, M - биты мантииссы; число представляется в виде $X=M \cdot 2^E$;

- строки символов в коде ASCII (упакованные по 4 символа в 3 байта);
- нумерованные элементы списков, кодированные как 8-битные целые.

Если результат выполнения команды не является успешным (индицируется статус "error"), в отклике не содержится данных. В успешный отклик на некоторые команды (например, типа "write") включаются те данные, которые передавались для записи или исполнения. Они берутся уже из памяти полевого устройства, что позволяет проконтролировать верность исполнения команды.

Байтовая структура данных, как правило, специфична для каждой команды. Некоторые подробности приведены в табл. 4.2 и 4.4.

4.8. Нумерованные элементы списков

Это особый и очень распространенный в HART-протоколе тип данных, в котором принято кодировать целым числом возможные альтернативные варианты для некоторой смысловой переменной. В табл. 4.1 приведены некоторые примеры. Привести перечень всех используемых списков здесь нет возможности. Подробности можно узнать в полном описании текущей версии HART.

Нумерованные элементы списков

Переменная	Значения
Идентификатор производителя	1-249, установлены Фондом HART-коммуникаций
Назначение устройства	0-249, устанавливаются каждым производителем
Единицы измерения	0-249, напр. 6 - psi, 7 - bar, 32 - °C, 33- °F и т.д.
Функция преобразования	0 - линейная, 1 - квадратичная и т.д.
Материал	0-249, напр. 2- нерж. сталь 316, 10 - PTFE, 18 - керамика
Защита от записи	0 - не защищено, 1 - защищено
Управление пакетным режимом	0 - выход из пакетного режима, 1 - вход в режим
Физический носитель сигнала и протокол	0 - двухчастотный ток (Bell 202), 1 - двухчастотное напряжение (Bell 202), 2 - RS-485, 3 - RS-232

4.9. Многопараметрические передатчики

Некоторые устройства измеряют более одной физической величины. Как уже отмечалось, существуют HART-команды, которые позволяют возвращать до 4-х результатов измерений в одном сообщении. В некоторых многопараметрических устройствах набор измеряемых величин предопределен, а в некоторых пользователь сам может выбрать 4 из 250 так называемых "переменных передатчика", определенных для данного устройства.

Команды #50 - #56 работают с такими "переменными передатчика", измеряющими их датчиками и их диапазонами. Например, команда #51 позволяет назначить "переменные передатчика" для главной (PV), второй (SV), третьей (TV) и четвертой (FV) переменных. После этого они могут многократно считываться с использованием команды #3. Несколько по-другому работает команда #33. Она позволяет описать до 4-х "переменных передатчика", включаемых в один ближайший отклик полевого устройства.

Многопараметрические передатчики могут также иметь возможность генерировать более одного аналогового выходного сигнала. Аналоговые выходы, пронумерованные с 1 по 4, соответствуют динамическим переменным (PV, SV, TV и FV). Эти аналоговые выходы совершенно не обязательно все должны представлять собой токи в диапазоне 4-20 мА. Здесь, например, даже частота считается аналого-

вой величиной. С управлением такими аналоговыми выходами связаны команды #60, #62 - #70.

4.10. Сводные таблицы команд

В представленных далее таблицах тип данных (в скобках) условно обозначен одной буквой в соответствии со следующим соглашением:

А - строка символов ASCII (по 4 символа в 3 байта),

В - битовые флаги,

D - дата (3 байта: день, месяц, год (2 последние цифры)),

F - число с плавающей точкой (4 байта по стандарту IEEE 754),

H - hardware revision - байт в формате xxxxx ууу (xxxxx - версия аппаратного обеспечения, ууу - код физического носителя сигнала (см. табл. 4.1)).

Некоторые команды в той или иной степени дублируют друг друга. Это особенно относится к более поздним версиям HART, в которых новые команды существуют наряду со старыми (оставленными для совместимости с устройствами, ориентированными на ранние версии).

Таблица 4.2

Универсальные команды в 5-й версии HART

Команда и ее номер	Данные в команде (тип)	Данные в отклике (тип)
0 Чтение уникального идентификатора устройства	нет	Байт 0 - "254" ("расширение") Байт 1 - код производителя Байт 2 - код типа устройства, присвоенный производителем Байт 3 - требуемое количество символов преамбулы Байт 4 - версия универсальных команд Байт 5 - версия специфичных команд Байт 6 - версия программного обеспечения Байт 7 - версия аппаратного обеспечения (H) Байт 8 - флаги функций устройства (B) Байт 9-11 - идентификационный номер устройства (ID)

1 Чтение главной переменной	нет	Байт 0 - код единицы измерения Байт 1-4 - первичная переменная (F)
2 Чтение абсолютного и относительного значений тока	нет	Байт 0-3 - ток (мА) (F) Байт 4-7 - ток (% от диапазона) (F)
3 Чтение значений тока и четырех динамических переменных	нет	Байт 0-3 - ток (мА) (F) Байт 4 - код единицы измерения главной переменной PV Байт 5-8 - главная переменная PV (F) Байт 9 - код единицы измерения второй переменной SV Байт 10-13 - вторая переменная SV (F) Байт 14 - код единицы измерения третьей переменной TV Байт 15-18 - третья переменная TV (F) Байт 19 - код единицы измерения четвертой переменной FV Байт 20-23 - четвертая переменная FV (F) (Общее кол-во байт может быть 8, 13, 18 или 23 в зависимости от числа поддерживаемых переменных)
6 Запись опросного адреса	Байт 0 - опросный адрес	как в команде
11 Чтение уникального идентификатора, ассоциированного с тэгом	Байт 0-5- тэг (A)	Байт 0-11 - как в команде #0
12 Чтение сообщения	нет	Байт 0-23 - сообщение (32 символа) (A)
13 Чтение тэга, дескриптора и даты	нет	Байт 0-5 - тэг (8 символов) (A) Байт 6-17 - дескриптор (16 символов) (A) Байт 18-20 - дата (D)
14 Чтение информации о датчике главной переменной PV	нет	Байт 0-2 – серийный номер датчика Байт 3 – код единицы измерения Байт 4-7 – верхний предел измерения (F) Байт 8-11 – нижний предел измерения (F) Байт 12-15 – минимальный диапазон (F)

15 Чтение выходной информации	нет	Байт 0 - код выбора аварийной сигнализации Байт 1 - код функции преобразования Байт 2 - код единицы измерения PV Байт 3-6 - верхний предел диапазона (F) Байт 7-10 - нижний предел диапазона (F) Байт 11-14 - время успокоения (с) (F) Байт 15 - код защиты от записи Байт 16 - код специальной метки дистрибьютора
16 Чтение заводского номера (номера конечной сборки)	нет	Байт 0-2 - номер конечной сборки
17 Запись сообщения	Байт 0-23 – сообщение (32 символа) (A)	как в команде
18 Запись тэга, дескриптора, даты	Байт 0-5 – тэг (8 символов) (A) Байт 6-17 – дескриптор (16 символов) (A) Байт 18-20 - дата (D)	как в команде
19 Запись заводского номера (номера конечной сборки)	Байт 0-2 - номер конечной сборки	как в команде

Универсальные команды в версиях HART 2, 3, 4 (отличия от версии 5)

Команда и ее номер	Данные в команде (тип)	Данные в отклике (тип)
0 Чтение уникального идентификатора устройства	нет	Байт 0 - код типа передатчика Байт 1 - количество символов преамбулы Байт 2 - версия универсальных команд Байт 3 - версия специфичных команд Байт 4 - версия программного обеспечения Байт 5 - версия аппаратного обеспечения (H) Байт 6 - флаги функций устройства (B) Байт 7-9 - заводской номер устройства (номер конечной сборки)
4 Чтение общих статических данных (блок 0): Чтение сообщения	Байт 0 - блок №0	Байт 0 - блок № 0 Байт 1-24 - сообщение (A)
4 Чтение общих статических данных (блок 1): Чтение тэга, дескриптора и даты	Байт 0 - блок №1	Байт 0 - блок №1 Байт 1-6 - тэг (A) Байт 7-18 - дескриптор (A) Байт 19-21 - дата (D) Байт 22-24 - "250"
4 Чтение общих статических данных (блок 2): Чтение информации о датчике	Байт 0 - блок №2	Байт 0 - блок №2 Байт 1-3 - серийный номер датчика Байт 4 - код единицы измерения Байт 5-8 - верхний предел измерения (F) Байт 9-12 - нижний предел измерения (F) Байт 13-16 - минимальный диапазон (F) Байт 17-24 - "250"

4 Чтение общих статических данных (блок 3): Чтение выходной информации	Байт 0 - блок №3	Байт 0 - блок №3 Байт 1 - код выбора аварийной сигнализации Байт 2 - код функции преобразования Байт 3 - код единицы измерения PV Байт 4-7 - верхний предел диапазона (F) Байт 8-11 - нижний предел диапазона (F) Байт 12-15 - время успокоения (с) (F) Байт 16 - код защиты от записи ("1" = "защищено") * Байт 17 - код специальной метки дистрибьютора ** Байт 18-24 - "250" * "250" или "251" в версиях 2 и 3 ** "250" в версиях 2 и 3
5 Запись общих статических данных (блок 0): Запись сообщения	Байт 0 - блок №0 Байт 1-24 - сообщение (A)	как в команде
5 Запись общих статических данных (блок 1): Запись тэга, дескриптора, даты	Байт 0 - блок №1 Байт 1-6 – тэг (A) Байт 7-18 - дескриптор (A) Байт 19-21 – дата (D) Байт 22-24 - "250"	как в команде
5 Запись общих статических данных (блок 4): Запись номера конечной сборки	Байт 0 - блок №4 Байт 1-3 - номер конечной сборки Байт 4-24 - "250"	как в команде
11-19	Этих команд нет в версиях, более ранних, чем версия 5	

Общеупотребительные команды

Команда и ее номер	Данные в команде (тип)	Данные в отклике (тип)
33 Чтение переменных передатчика	<p>Байт 0 - код переменной передатчика для слота 0</p> <p>Байт 1 - код переменной передатчика для слота 1</p> <p>Байт 2 - код переменной передатчика для слота 2</p> <p>Байт 3 - код переменной передатчика для слота 3</p> <p>(Данные могут обрываться после последнего запрошенного кода)</p>	<p>Байт 0 - код переменной передатчика для слота 0</p> <p>Байт 1 - код единицы измерения для слота 0</p> <p>Байт 2-5 - переменная для слота 0 (F)</p> <p>Байт 6 - код переменной передатчика для слота 1</p> <p>Байт 7 - код единицы измерения для слота 1</p> <p>Байт 8-11 - переменная для слота 1 (F)</p> <p>Байт 12 - код переменной передатчика для слота 2</p> <p>Байт 13 - код единицы измерения для слота 2</p> <p>Байт 14-17 - переменная для слота 2 (F)</p> <p>Байт 18 - код переменной передатчика для слота 3</p> <p>Байт 19 - код единицы измерения для слота 3</p> <p>Байт 20-23 - переменная для слота 3 (F)</p> <p>(Данные могут обрываться после последней выданной переменной)</p>
34 Запись значения времени успокоения	Байт 0-3 – время успокоения (с) (F)	как в команде
35 Запись пределов измерения	<p>Байт 0 - код единицы измерения</p> <p>Байт 1-4 - верхний предел (F)</p> <p>Байт 5-8 - нижний предел (F)</p>	как в команде

36 Установка верхнего значе- ния диапазона (соответствует нажатию кнопки "Диапазон")	нет	нет
37 Установка нижнего значе- ния диапазона (соответствует нажатию кнопки "Ноль")	нет	нет
38 Сброс флага "Конфигурация изменена"	нет	нет
39 Управление ПЗУ	Байт 0 - код управления ПЗУ* * 0 - записать в ПЗУ, 1 - копировать содержимое ПЗУ в ОЗУ	как в команде
40 Управление режимом фик- сированного то- ка	Байт 0-3 - значение тока (мА) * (F) * 0 - выход из режима	как в команде
41 Выполнение самотестирова- ния устройства	нет	нет
42 Выполнение сброса хост-уст- ройства	нет	нет
43 Настроить ноль главной переменной PV	нет	нет
44 Запись еди- ницы измерения главной пе- ременной PV	Байт 0 – код единицы изме- рения	как в команде
45 Настроить ноль ЦАП	Байт 0-3 - значение тока (мА) (F)	как в команде

46 Настроить коэффициент преобразования ЦАП	Байт 0-3 - значение тока (мА) (F)	как в команде
47 Запись функции преобразования	Байт 0 – код функции преобразования	как в команде
48 Чтение дополнительного статуса устройства	нет	Байт 0-5 - статус устройства (B) Байт 6-7 - рабочие режимы Байт 8-10 - аналоговые выходы, находящиеся в насыщении (B) Байт 11-13 - аналоговые выходы, имеющие фиксированные значения (B) Байт 14-24 - статус устройства (B)
49 Запись серийного номера датчика главной переменной PV	Байт 0-2 - серийный номер датчика	как в команде
50 Чтение кодов переменных передатчика, соответствующих динамическим переменным	нет	Байт 0 - код переменной передатчика для главной переменной PV Байт 1 - код переменной передатчика для второй переменной SV Байт 2 - код переменной передатчика для третьей переменной TV Байт 3 - код переменной передатчика для четвертой переменной FV
51 Запись кодов переменных передатчика, соответствующих динамическим переменным	Байт 0 - код переменной передатчика для главной переменной PV Байт 1 - код переменной передатчика для второй переменной SV Байт 2 - код переменной передатчика для третьей переменной TV Байт 3 – код переменной передатчика для четвертой переменной FV	как в команде

52 Установить ноль переменной передатчика	Байт 0 – код переменной передатчика	как в команде
53 Запись единицы измерения для переменной передатчика	Байт 0 – код переменной передатчика Байт 1 – код единицы измерения	как в команде
54 Чтение информации о переменной передатчика	Байт 0 – код переменной передатчика	Байт 0 – код переменной передатчика Байт 1-3 – серийный номер датчика для переменной передатчика Байт 4 – код единицы измерения Байт 5-8 – верхний предел измерения (F) Байт 9-12 – нижний предел измерения (F) Байт 13-16 – время успокоения (с) (F) Байт 17-20 – минимальный диапазон (F)
55 Запись времени успокоения для переменной передатчика	Байт 0 – код переменной передатчика Байт 1-4 – время успокоения (с) (F)	как в команде
56 Запись серийного номера датчика переменной передатчика	Байт 0 – код переменной передатчика Байт 1-3 – серийный номер датчика (F)	как в команде
57 Чтение тэга, дескриптора и даты для блока	нет	Байт 0-5 – тэг (8 символов) (A) Байт 6-17 - дескриптор (16 символов) (A) Байт 18-20 – дата (D)

58 Запись тэга, дескриптора и даты для блока	Байт 0-5 - тэг (8 символов) (A) Байт 6-17 - дескриптор (16 символов.) (A) Байт 18-20 - дата (D)	как в команде
59 Запись количества символов преамбулы в отклике	Байт 0 - количество символов преамбулы	как в команде
60 Чтение значения аналогового выхода	Байт 0 - код аналогового выхода	Байт 0 - код аналогового выхода Байт 1 - код единицы измерения Байт 2-5 - значение аналогового выхода (F) Байт 6-9 - относительное значение аналогового выхода (в % от диапазона) (F)
61 Чтение динамических переменных и аналогового выхода	нет	Байт 0 - код единицы измерения аналоговой величины Байт 1-4 - значение аналоговой величины (F) Байт 5- код единицы измерения главной переменной PV Байт 6-9 - главная переменная PV (F) Байт 10 - код единицы измерения второй переменной SV Байт 11-14 - вторая переменная SV (F) Байт 15 - код единицы измерения третьей переменной TV Байт 16-19 - третья переменная TV (F) Байт 20 - код единицы измерения четвертой переменной FV Байт 21-24 - четвертая переменная FV (F) (Общее кол-во байт может быть 9, 14, 19 или 24 в зависимости от числа поддерживаемых переменных)

62 Чтение значений аналоговых выходов	Байт 0 - код номера аналогового выхода для слота 0 Байт 1 - код номера аналогового выхода для слота 1 Байт 2 - код номера аналогового выхода для слота 2 Байт 3 - код номера аналогового выхода для слота 3 (Данные могут обрываться после последнего запрошенного кода)	Байт 0 - код номера аналогового выхода для слота 0 Байт 1 - код единицы измерения для слота 0 Байт 2-5 - значение выхода для слота 0 (F) Байт 6 - код номера аналогового выхода для слота 1 Байт 7 - код единицы измерения для слота 1 Байт 8-11 - значение выхода для слота 1 (F) Байт 12 - код номера аналогового выхода для слота 2 Байт 13 - код единицы измерения для слота 2 Байт 14-17 - значение выхода для слота 2 (F) Байт 18 - код номера аналогового выхода для слота 3 Байт 19 - код единицы измерения для слота 3 Байт 20-23 - значение выхода для слота 3 (F) (Данные могут обрываться после последнего выданного значения выхода)
63 Чтение информации об аналоговом выходе	Байт 0 - код номера аналогового выхода	Байт 0 - код номера аналогового выхода Байт 1 - код выбора аварийной сигнализации Байт 2 - код функции преобразования Байт 3 - код единицы измерения Байт 4-7 - верхний предел диапазона (F) Байт 8-11 - нижний предел диапазона (F) Байт 12-15 - время успокоения (с) (F)

64 Запись времени успокоения для аналогового выхода	Байт 0 - код номера аналогового выхода Байт 1-4 - время успокоения (с) (F)	как в команде
65 Запись границ диапазона для аналогового выхода	Байт 0 - код номера аналогового выхода Байт 1 - код единицы измерения Байт 2-5 - верхний предел диапазона (F) Байт 6-9 - нижний предел диапазона (F)	как в команде
66 Управление режимом фиксированного значения аналогового выхода	Байт 0 - код номера аналогового выхода Байт 1 - код единицы измерения Байт 2-5 - фиксируемое значение аналогового выхода* (F) * - нечисловое значение приводит к выходу из режима	как в команде
67 Настройка нуля аналогового выхода	Байт 0 - код номера аналогового выхода Байт 1 - код единицы измерения Байт 2-5 - измеренное внешним прибором значение аналогового выхода (F)	как в команде
68 Настройка диапазона аналогового выхода	Байт 0 - код номера аналогового выхода Байт 1 - код единицы измерения Байт 2-5 - измеренное внешним прибором значение аналогового выхода (F)	как в команде
69 Запись функции преобразования аналогового выхода	Байт 0 - код номера аналогового выхода Байт 1 - код функции преобразования	как в команде

70 Чтение максимального и минимального значения аналогового выхода	Байт 0 - код номера аналогового выхода	Байт 0 - код номера аналогового выхода Байт 1 - код единицы измерения Байт 2-5 - максимальное значение аналогового выхода (F) Байт 6-9 - минимальное значение аналогового выхода (F)
107 Запись переменных передатчика для пакетного режима (для команды #33)	Байт 0 - код переменной передатчика для слота 0 Байт 1 - код переменной передатчика для слота 1 Байт 2 - код переменной передатчика для слота 2 Байт 3 - код переменной передатчика для слота 3	как в команде
108 Запись номера команды пакетного режима	Байт 0 - номер команды пакетного режима	как в команде
109 Управление пакетным режимом	Байт 0 - код управления пакетным режимом (1- вход, 0 - выход)	как в команде
110 Чтение всех динамических переменных	нет	Байт 0 - код единицы измерения главной переменной PV (F) Байт 1-4 - значение PV (F) Байт 5 - код единицы измерения второй переменной SV (F) Байт 6-9 - значение SV (F) Байт 10 - код единицы измерения третьей переменной TV (F) Байт 11-14 - значение TV (F) Байт 15 - код единицы измерения четвертой переменной FV (F) Байт 16-19 - значение FV (F)

4.11. Статусная информация

Два байта так называемого "статуса" (или "кода отклика") включаются в каждое сообщение полевого устройства. Эти байты могут нести информацию трех типов: коммуникационные ошибки, отклики на команду и собственно статус (состояние) устройства.

В табл. 4.5 показано, как это делается. Если в последней транзакции обнаружена ошибка, старший бит (бит 7) первого байта устанавливается в "1", а детальное описание ошибки содержится в оставшейся части этого байта. Второй байт при этом полностью заполнен нулями. Если же транзакция проходит успешно, то бит 7 первого байта устанавливается в "0", а остаток байта содержит отклик на команду, который может индизировать некоторые проблемы, связанные с самой командой, а второй байт содержит статус полевого устройства, индизирующий его текущее состояние.

Коммуникационные ошибки - это, в основном, те, которые детектируются микросхемой UART - универсальным асинхронным приемопередатчиком: ошибки четности, перегрузки по скорости обмена и ошибки синхронизации (формата посылки). Кроме того, полевое устройство может сообщать о переполнении своего приемного буфера и несоответствиях между содержимым сообщения и принятой контрольной суммой.

Коды отклика на команду (целые числа 0..127) подразделяются, с одной стороны, на ошибки и предупреждения, и, с другой стороны, на однозначные и многозначные. Их числовые значения показаны в табл. 4.6. Видно, что распределены они довольно странно. Это результат стремления сохранить совместимость с ранними версиями HART.

В табл. 4.5 показаны коды откликов на команды, которые могут быть применены к любой транзакции. В табл. 4.7 показаны те из них, которые имеют разные значения в зависимости от конкретной универсальной или общеупотребительной команды. В специфичных командах могут использоваться такие же значения для указанных кодов или определяться свои особые для какого-либо устройства.

Статус полевого устройства включает в себя сообщения о ненормальных условиях или нарушении рабочих режимов. Это, следовательно, еще не говорит о неисправности устройства. В табл. 4.5 показана расшифровка этого байта, а в табл. 4.8 описаны значения каждого из сообщаемых состояний.

Коды откликов на команду

Первый байт статусного поля:

Бит 7 = 1: Коммуникационная ошибка
Бит 6 - ошибка четности
Бит 5 - перегрузка по скорости обмена
Бит 4 - ошибка синхронизации (формата посылки)
Бит 3 - несоответствие контрольной суммы
Бит 2 - 0 (резерв)
Бит 1 - переполнение буфера приемника
Бит 0 - (не определен)

или

Бит 7 = 0: Отклик на команду
Биты с 6 по 0 (декодируются как одно целое, без разбивки на отдельные биты):
0 - нет команды
1 - (не определен)
2 - неверный выбор
3 - последний параметр слишком велик
4 - последний параметр слишком мал
5 - получено слишком мало байтов данных
6 - ошибка специфичной команды
7 - выставлен режим защиты от записи
8-15 - значения различны для разных команд (см. табл. 4.7)
16 - доступ ограничен
28 - значения различны для разных команд (см. табл. 4.7)
32 - устройство занято
64 - команда не реализована

Второй байт статусного поля:

(не используется)
Бит 7
Бит 6
Бит 5 Все биты = 0
Бит 4 (когда в первом байте
Бит 3 сообщается о
Бит 2 коммуникационной
Бит 1 ошибке)
Бит 0

или

Статус полевого устройства:
Бит 7 - Field device malfunction: неисправность устройства
Бит 6 - Configuration changed: конфигурация изменена
Бит 5 - Cold start: "холодный" старт
Бит 4 - More status available: доступна дополнительная статусная информация
Бит 3 - Analogue output fixed: значение аналогового выхода фиксировано
Бит 2 - Analogue output saturated: аналоговый выход в насыщении
Бит 1 - Non-primary variable out of limits: значение неглавной переменной вне установленных пределов
Бит 0 - Primary variable out of limits: значение главной переменной вне установленных пределов (см. также табл. 4.8)

Многие устройства предоставляют больше статусной информации, чем может заключаться в одном байте. Для таких устройств 4-й бит статусного байта устанавливается в "1", индицируя возможность предоставления расширенной статусной информации, которая может быть получена с помощью команды #48.

Изначально байты данных в отклике на команду #48 были оставлены открытыми для разработчиков устройств, но начиная с версии 5.1 байты с 6 по 13 имеют особые назначения, индицируя рабочие режимы и статус аналоговых выходов (табл. 4.4). Оставшиеся байты могут быть заполнены по желанию разработчика. Они обычно побитно разбиваются для индикации каких-либо состояний узлов устройства.

Таблица 4.6

Классификация откликов на команду

	Ошибки	Предупреждения
Однозначные	1-7 16-23 32-64	24-27 96-111
Многозначные	9-13 15 28, 29 65-95	8 14 30, 31 112-127

Таблица 4.7

Многозначные коды откликов

Код	Команды	Альтернативные значения
8*	1, 2, 3, 33, 60, 61, 62, 110 34, 55, 64 48	Данные не обновляются Установлено в ближайшее возможное значение Происходит обновление данных
9	35, 65 36, 37, 43, 52 45, 46, 67, 68	Нижнее значение диапазона слишком высокое Выставляемое значение слишком велико Конфликт с текущим режимом аналогового выхода (установлен фиксированный ток)
10	6 35, 65 36, 37, 43, 52	Многоточечный режим не поддерживается Нижнее значение диапазона слишком низкое Выставляемое значение слишком мало
11	35, 65 40, 45, 46, 66, 67, 68 53	Верхнее значение диапазона слишком высокое Устройство в многоточечном режиме Неверный код переменной передатчика
12	35, 65 53, 66, 67, 68	Верхнее значение диапазона слишком низкое Неверный код единицы измерения
13	35, 65 69	Оба крайних значения диапазона вне возможных пределов Неверный код функции преобразования
14*	35, 36, 65 37	Коэффициент усиления слишком мал Верхнее значение диапазона вышло за установленный предел
15	65, 66, 67, 68, 69	Неверный код номера аналогового выхода
28	65	Неверный код единицы измерения

* коды 8 и 14 воспринимаются как предупреждения, остальные - как ошибки

Таблица 4.8

Статус полевого устройства

Индицируемый статус	Значение
Field device malfunction	Устройство неисправно, и измерения могут быть недостоверны
Configuration changed	Устанавливается всегда, когда происходит изменение конфигурации с хоста или портативного конфигулятора. Главное управляющее устройство воспринимает "1" в данном бите как необходимость считать и запомнить конфигурационную информацию и затем сбросить значение бита в "0" посылкой команды #38
Cold start	Устанавливается только на одну транзакцию в момент включения полевого устройства
More status available	Фактически приглашение использовать команду #48 для получения дополнительной статусной информации
Analogue output fixed	Устройство находится в многоточечном режиме, или аналоговый выход установлен в фиксированное значение (например, при тестировании). Этот бит относится только к аналоговому выходу #1. В многопараметрическом устройстве команда #48 может вернуть такую же статусную информацию для других выходов
Analogue output saturated	Результат измерения (для аналогового выхода #1) за пределами диапазона. Обычно при линейной шкале этот бит устанавливается в "1" по достижении значений ниже 3,9 мА и выше 20,8 мА. Для многопараметрических устройств команда #48 может вернуть такую же статусную информацию для разных выходов
Primary variable out of limits	Значение главной переменной находится за пределами рабочего диапазона датчика. Поэтому результат может оказаться недостоверным
Non-primary variable out of limits	То же, но для одной или более неглавных переменных. Пока нет средств для обнаружения конкретной переменной, значение которой вышло за пределы (кроме команды #48)

4.12. Резюме

HART-команды подразделяются на три группы: универсальные, общеупотребительные и специфичные.

Данные в сообщениях могут быть целыми числами, числами с плавающей точкой, символьными строками или нумерованными элементами списков.

Существуют команды для идентификации полевых устройств, для чтения значений переменных, для установки многоточечного режима, для поддержки многопараметрических устройств и др.

Сообщения от полевого устройства содержат статусную информацию, описывающую текущее состояние устройства и коммуникационного обмена.

Глава 5. DDL - язык описания устройств

5.1. Введение

Язык описания устройств DDL (Device Description Language) решает многие проблемы, касающиеся ввода и эксплуатации новых интеллектуальных устройств. Само по себе использование коммуникационного протокола еще недостаточно для обеспечения эффективной работы системы, поскольку разные устройства обычно имеют индивидуальные особенности по работе с данными. Ранее, в эпоху первых версий HART, это означало, что хост-устройства должны были подвергаться доработке по изменению их программного обеспечения при каждой смене моделей применяемых полевых устройств. Это приводило к существенным затратам средств и времени, ограничивало области применения конкретных хост-устройств (обычно поставщики хост-устройств являлись и поставщиками сопряженных с ними полевых устройств). С ростом популярности HART-протокола и увеличением числа производителей HART-устройств стало очевидно, что дальше невозможно наращивать выпуск хост-устройств с таким негибким программным обеспечением, которое не позволяет потребителю пользоваться всей широкой номенклатурой выпускаемых полевых устройств.

Эта проблема решается с помощью DDL. Специальные описания устройств, реализуемые в нем, позволяют осуществить быструю модернизацию хостов для поддержки новых полевых устройств без переписывания программного обеспечения. Этот язык может быть использован в любом хост-устройстве для обеспечения полного и точного интерфейса с каждым полевым устройством. DDL обеспечивает полную совместимость устройств от разных производителей. Пользователь может теперь выбирать лучшие приборы для конкретных задач и не зависеть от поставщиков законченных систем.

В этой главе описаны далеко не все особенности DDL. Для ознакомления с полным описанием текущей версии DDL, соответствующим инструментарием и учебными материалами следует обратиться в Фонд HART-коммуникаций.

5.2. Что представляет собой DDL

DDL - формальный язык для полного и однозначного описания полевого устройства, которое доступно в процессе обращения к нему посредством цифровых коммуникаций. DDL формирует как бы дополнительный "слой пользователя" на вершине OSI-модели коммуникационной системы (см. 2.1).

DDL включает в себя описания доступных переменных, набор поддерживаемых команд и описания рабочих процедур (таких как калибровка). Он содержит также описание структур меню, которые использует оператор при работе с хост-устройством. Описание устройства, записанное в текстовом формате, доступном для смыслового восприятия, содержит список объектов с описанием свойств (атрибутов) каждого. Примерные фрагменты описания некоего абстрактного расходомера приведены на рис. 5.1.

Основные типы объектов DDL (табл. 5.1):

- Переменная - любая поименованная разновидность данных полевого устройства, относящаяся к измерениям, рабочим параметрам, информации об устройстве. Среди прочих атрибутов у переменных есть дисплейная метка (набор символов, которым представлена переменная на дисплее) и тип данных. В табл. 5.2 приведен список возможных типов данных.

- Команда - объект, описывающий HART-команду. Определяется полями данных запроса и ответа, а также статусной информацией (кодом отклика).

- Меню - средство представления информации оператору. Определяется как список других объектов (переменных, экранов редактирования, вложенных подменю и методов).

- Экран редактирования - объект, формирующий экран (например, дисплей портативного коммуникатора). Определяется списком переменных для обзора и/или редактирования и процедур (методов), выполняемых до или после редактирования.

- Метод - определенная последовательность взаимодействий хост-устройства с полевым устройством и оператором для выполнения определенных операций (таких как калибровка, смена диапазона и др.). Действия описываются с использованием одного из подмножеств языка C. Есть библиотека встроенных функций, таких как: посылка команд на полевое устройство, анализ откликов, вывод сообщений на экран, клавиатурный ввод.

```

VARIABLE low_flow_cutoff
{
  LABEL [low_flow_cutoff];
  HELP "Low Flow Cutoff - The value below which the process variable will indicate zero,
      to prevent noise or a small zero error being interpreted as a real flow rate.";
  TYPE FLOAT
  {
    DISPLAY_FORMAT "6.4f";          /* ##.#### */
  }
  CONSTANT_UNIT "%";
  HANDLING READ & WRITE;
}

MENU configure_io
{
  LABEL [configure_io];

  ITEMS
  {
    flow_units,          /* variable */
    rerange,             /* edit-display */
    low_flow_cutoff,     /* variable */
    flow_tube_config,    /* menu */
    pulse_output_config  /* menu */
  }
}

COMMAND write_low_flow_cutoff
{
  NUMBER 137;
  OPERATION WRITE;
  TRANSACTION
  {
    REQUEST
    {
      low_flow_cutoff
    }
    REPLY
    {
      response_code,
      device_status,
      low_flow_cutoff
    }
  }
  RESPONSE_CODES
  {
    0, SUCCESS,          [no_command_specific_errors];
    3, DATA_ENTRY_ERROR, [passed_parameter_too_large];
    4, DATA_ENTRY_ERROR, [passed_parameter_too_small];
    5, MISC_ERROR,       [too_few_data_bytes_received];
    7, MODE_ERROR,       [in_write_protect_mode];
  }
}

```

Рис. 5.1. Фрагмент описания устройства в DDL

- Примечания:
1. Заглавными буквами выделены ключевые слова DDL.
 2. Текст, заключенный в скобки /*...*/, - комментарии.
 3. Записи, заключенные в квадратные скобки, являются ссылками на стандартный словарь

Среди встроенных функций есть такие, которые позволяют системе продолжать работу в условиях ошибок и сбоев. Метод также может быть использован для выдачи оператору предупреждения перед выполнением какого-либо действия, которое может неблагоприятно повлиять на функционирование системы.

Переменные (как и другие объекты) могут также группироваться в так называемые ряды (arrays), коллекции (collections) и отношения (relations) для выражения их функциональной схожести или взаимозависимости.

В определении многих атрибутов разрешены арифметические, логические или условные выражения. Это позволяет обрабатывать информацию по-разному в зависимости от текущих обстоятельств (например, конфигурационных параметров или рабочих режимов).

Так называемый стандартный словарь используется для перевода общих фраз языка DDL на разные другие языки: немецкий, французский и др. (рис. 5.2). Его использование дает следующие преимущества:

- Описания устройств и скомпилированные DDL-программы становятся короче, т.к. вместо текста, повторяющегося на разных языках, используются просто ссылки на словарь.
- Возможность одновременного мгновенного перевода на несколько языков.
- Разные производители устройств используют четкую и однозначную терминологию описания устройств.

[251, 2]	square_root	"Sq root", " 033 Racine carree", " 049 Radiziert"
[251, 3]	linear_with_input	"Linear with input", " 033 Lineaire avec entree", " 049 Linear z. Eingang"
[254, 2]	passed_parameter_too_large	"Value was too high", " 033 Val trop haute", " 049 Wert war zu hoch",
[301, 34]	remove_from_auto_befor_send	"WARN – Remove loop from automatic control before sending. You may return loop to automatic control after sending.", " 049 WARNUNG - Vor Senden die automatische Steuerung abschalten. Steuerg. ev. wieder einschalten."

Рис. 5-2. Пример входов в стандартный словарь

Примечание: Для идентификации языка, отличного от американского английского, обычно используют международные телефонные коды соответствующих стран (здесь: 033, 049)

5.3. Преимущества DDL

Главной выгодой от использования DDL с точки зрения поставщиков является то, что отделяются друг от друга разработки хост-устройств и полевых устройств. Каждый разработчик может теперь разрабатывать продукты с уверенностью, что они будут совместимы с тем, что было создано в этой области ранее и с тем, что будет создаваться потом. Кроме того, для отладки интерфейса с конкретным устройством можно использовать программу-имитатор этого устройства вместо него самого.

С точки зрения пользователя, главным преимуществом DDL является возможность применять продукты разных поставщиков с уверенностью, что можно будет полностью использовать возможности каждого. Для включения нового полевого устройства требуются лишь небольшие корректировки в программном обеспечении хоста. Становится желательным и выгодным обновление состава полевых устройств в системе.

Использование стандартного словаря, с одной стороны, обеспечивает мгновенный перевод на все поддерживаемые языки, а с другой, способствует тому, чтобы разработчики стремились к единообразной и совместимой реализации типовых задач. “Совместимые” описания устройств (см. 5.4) способствуют реальной взаимозаменяемости устройств одного и того же назначения.

Таблица 5.1

Основные типы объектов DDL

Тип объекта	Атрибуты	Комментарии
VARIABLE (Переменная)	name	Имя для перекрестных ссылок
	LABEL	Имя переменной, отображаемое на дисплее
	TYPE	Тип данных (см. табл. 5.2)
	CLASS	Класс по назначению ¹
	HANDLING	Принадлежность командам: READ или WRITE
	CONSTANT_UNIT	Единица измерения
	VALIDITY	Условие, при котором переменная имеет смысл ²
	HELP	Текст подсказки
	READ_&_WRITE_ TIMEOUTs	Время, в течение которого хост может ожидать завершения чтения или записи

COMMAND (Команда)	name NUMBER OPERATION TRANSACTION REQUEST REPLY RESPONSE_CODES	Имя для перекрестных ссылок Номер HART-команды READ, WRITE или другая команда Данные, включенные в команду Данные, включенные в отклик Код отклика + дополнительная информация ³
MENU (Меню)	name LABEL ITEMS	Имя для перекрестных ссылок Имя меню, отображаемое на дисплее Список переменных, меню, экранов редактирования и/или методов
EDIT_DISPLAY (Экран редактирования)	name LABEL DISPLAY_ITEMS EDIT_ITEMS PRE_EDIT_ACTIONS POST_EDIT_ACTIONS	Имя для перекрестных ссылок Отображаемое на дисплее имя экрана Список переменных только для отображения Список переменных для редактирования Методы, применяемые до редактирования Методы, применяемые после редактирования
METHOD (Метод)	name LABEL CLASS DEFINITION VALIDITY HELP	Имя для перекрестных ссылок Отображаемое на дисплее имя метода Класс по назначению ¹ Последовательность операторов на языке C Условие, при котором метод имеет смысл ² Текст подсказки

1. Существуют, например, такие классы: DEVICE, INPUT, CORRECTION, DYNAMIC, DIAGNOSTIC, SERVICE

2. Атрибут VALIDITY представляет собой условное выражение, принимающее значение TRUE или FALSE в зависимости от значений других переменных, описывающих текущие обстоятельства (режим, диапазон и др.)

3. Код отклика выбирается из ограниченного множества возможных значений и сопровождается соответствующей дополнительной информацией, а именно выдается тип отклика, описание и текст помощи-подсказки.

Основные типы переменных DDL

Типы переменных	Атрибуты	Комментарии
<i>Арифметические:</i> FLOAT DOUBLE INTEGER UN- SIGNED_INTEGER	Размер (в байтах) Размер (в байтах) DISPLAY_FORMAT EDIT_FORMAT MIN_VALUE MAX_VALUE SCALING_FACTOR	4-байтовый формат (IEEE 754) 8-байтовый формат (IEEE 754) Формат вывода (как в операторе C “printf”) Формат ввода (как в операторе C “scanf”) Нижний предел значений переменной Верхний предел значений переменной Множитель для вывода на экран
<i>Нумерованные:</i> ENUMERATED BIT_ENUMERATED	Размер (в байтах) Размер (в байтах)	Числовое значение + дополнительная информация ¹ Набор битов + дополнительная информация ²
<i>Строковые:</i> ASCII PACKED_ASCII PASSWORD BITSTRING	Длина (символов) Длина (символов) Длина (символов) Длина (в битах)	128 символов по ISO 8859/1 (Latin 1) Усеченный ASCII (6 бит на символ) На экране выглядит как *****
<i>Дата и время:</i> DATE TIME DATE_AND_TIME DURATION		3-байтовый формат (DD.MM.YY) Формат еще не определен Формат еще не определен Формат еще не определен

1. Числовое значение выбирается из ограниченного множества возможных значений и сопровождается соответствующей дополнительной информацией, а именно выдается описание и текст помощи-подсказки

2. Выдается числовое значение, информацию в котором несет его побитное представление. Дополнительная информация включает в себя описание, текст помощи-подсказки, а также классификацию каждого бита по назначению

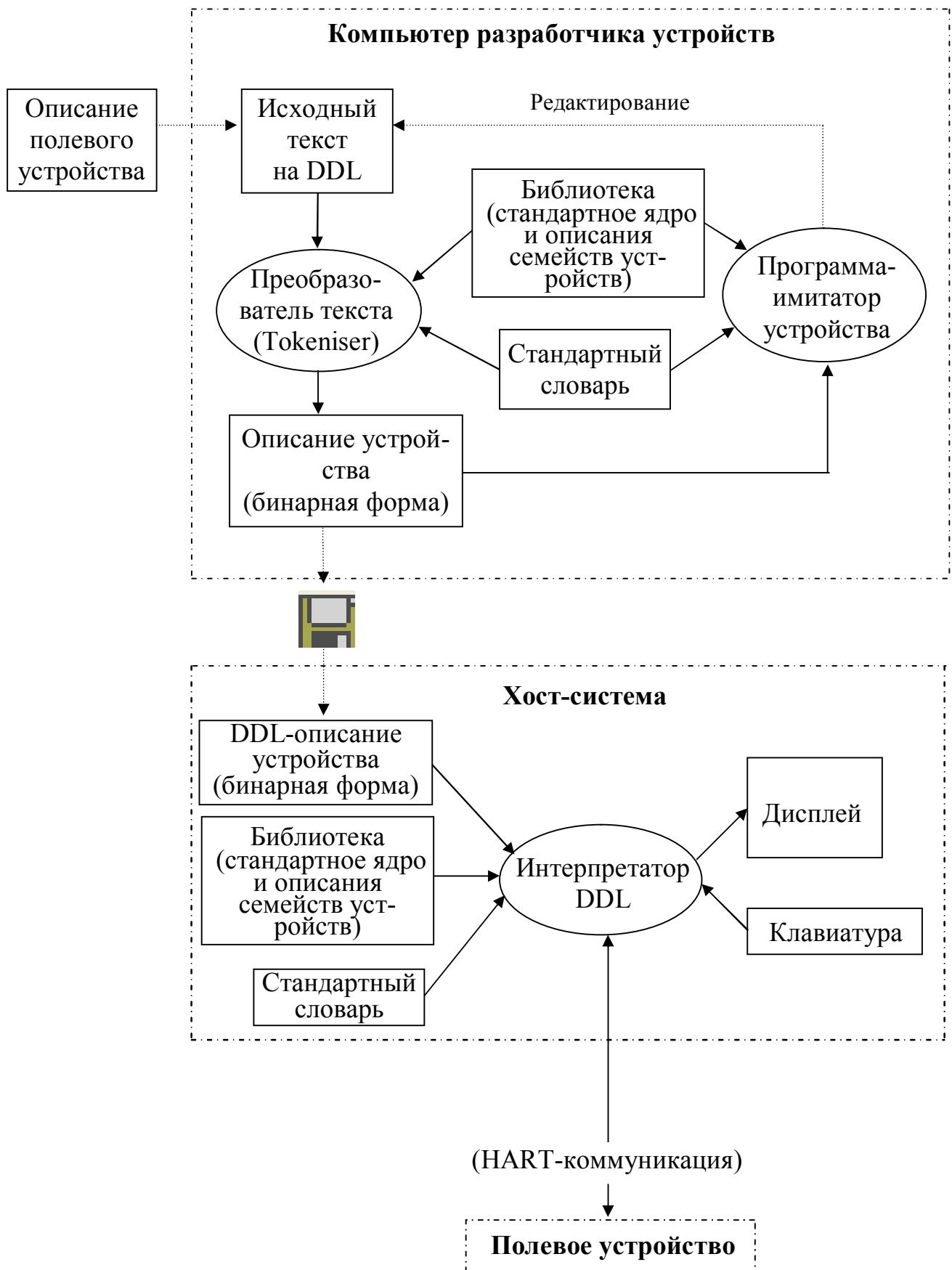


Рис. 5.3. Генерация и использование описаний устройств

5.4. Создание описания устройства

На рис.5.3 представлен процесс создания и использования описания устройства. Создание этого описания требует ответственного подхода со стороны разработчика устройства, который вначале пишет исходный текст описания на языке DDL. Поэтому оно должно быть грамотно составлено, легко читаться и полностью описывать устройство. Разработчик в новой программе-описании может не описывать каждый раз стандартные повторяющиеся данные и команды из числа универсальных и общеупотребительных, а импортировать их из специальной библиотеки. Кроме того, Фонд HART-коммуникаций рекомендует использовать универсальные параметры и процедуры для совместимых устройств одного назначения (например, для измерителей температуры, давления, уровня, расхода, управляемых приводов задвижек).

После написания DDL-текст обрабатывается специальной программой-преобразователем (так называемым “токенайзером”), которая “сжимает” описание, заменяя стандартные слова и фразы числовыми кодами (ссылками на стандартный словарь и библиотеку стандартных описаний). Так получается преобразованное описание, которое называют иногда “ссылочное” или “бинарное”. Последнее название получило распространение оттого, что дистрибутивной формой этих описаний (т.е. той формой, в которой они попадают в хост-систему) является именно бинарная (двоичная) форма. Но это еще не исполняемый машинный код, - он формируется позже интерпретатором в хост-системе.

Программа-имитатор используется разработчиком для просмотра и отладки разработанного интерфейса с пользователем. Если необходимо, исходный текст редактируется, и затем процедура преобразования его токенайзером повторяется.

Библиотека стандартных описаний и стандартный словарь, а также токенайзеры и имитаторы для IBM-совместимых компьютеров распространяются Фондом HART-коммуникаций.

Программисты, составляющие описания на DDL, должны избегать таких фрагментов описаний, которые допускают действия или ситуации, не разрешенные другими требованиями HART-протокола.

5.5. Использование описаний устройств

Одной из задач разработчиков хост-систем является написание такой программы (интерпретатора), которая может интерпретировать описания полевых устройств, генерируя при этом соответствующие виды экрана и реализуя взаимодействие оператора и HART-команд. Интерпретатор должен быть рассчитан на возможные изменения аппаратной и программной среды хост-системы. Интерпретатор должен обеспечивать все сервисные возможности, которые могут быть описаны на DDL, однако это не значит, что он должен содержать в себе абсолютно полный код реализации объектов DDL. Большая часть его заключена в библиотеке описаний, где содержатся коды реализации для универсальных и общеупотребительных команд (стандартное ядро) и коды для семейств совместимых устройств. Обычно интерпретатор, работая с идентифицированным полевым устройством, по мере необходимости обращается к этой библиотеке, а также к стандартному словарю.

Хост-система должна работать с любым устройством, представленным ей. Если система не имеет файла описания какого-либо специфического устройства, она обращается к библиотеке стандартных описаний. Таким образом, для любого устройства обеспечиваются всегда как минимум базовые возможности. Полностью возможности специфического устройства реализуются при загрузке описания этого устройства.

В некоторых хост-системах наборы специфических описаний устройств и стандартные описания могут быть заранее объединены. Это может быть сделано в режиме off-line с помощью специальной программы-линкера, которая считывает описания для некоторого количества устройств, объединяет их и представляет в специальной форме интерпретатору. Описание устройства может быть представлено интерпретатору также по сети в режиме on-line тогда, когда новое устройство включается в систему.

5.6. Распространение описаний устройств

Для нормальной работы хост-системы с некоторым набором полевых устройств необходимо наличие файлов описаний этих устройств. Эти файлы могут загружаться в хост-систему по-разному: например, путем копирования с флоппи-диска или посредством после-

довательного порта. Возможен также вариант, когда разработчики обновляют информацию во встраиваемых модулях памяти портативных коммуникаторов. В любом случае набор используемых устройств всегда должен соответствовать набору их описаний. Обычно разработчики систем предлагают потребителям базовый набор описаний устройств и услуги по последующей инсталляции новых описаний. Впрочем, процедура модернизации пакета описаний довольно проста и может выполняться самим пользователем.

Фонд HART-коммуникаций содержит централизованный архив зарегистрированных и протестированных описаний устройств, который регулярно обновляется. Многие производители полевых приборов также поставляют напрямую своим покупателям свежие версии описаний своих устройств.

В будущем, видимо, будет происходить дальнейшее снижение стоимости микросхем памяти и уменьшение потребляемой ими мощности. Поэтому можно предположить, что станет выгодным описание полевых устройств заносить в память самих устройств. Хост-система сможет считывать это описание при первом подключении нового устройства. Такое решение было бы рационально, так как оно избавило бы пользователей от необходимости отслеживать соответствие устройств их описаниям. Однако на сегодняшний день HART-протокол не содержит соответствующих команд для таких процедур. Кроме того, он работает довольно медленно: на полную загрузку описаний устройств могут уходить многие минуты. Здесь напрашивается такое техническое решение, которое реализовывало бы подгрузку описаний не полностью, а только тех их частей, которые в новых устройствах отличаются от старых.

5.7. Резюме

Язык описания устройств DDL – вспомогательное средство для HART-систем, служащее для полного описания поведения полевых устройств в коммуникационной сети. DDL предоставляет набор типов объектов и их атрибутов, по которым могут быть построены описания данных, команд, меню и видов экранов. Особые объекты DDL – методы, посредством которых описывается взаимодействие с оператором. Описания устройств могут импортироваться и заменяться.

Проводя аналогии, можно сказать, что DDL для HART-систем - это то же, что HTML для Интернета.

Посредством DDL реализуется совместимость устройств от различных производителей. Почти все фирмы-производители, являющиеся членами Фонда HART-коммуникаций, используют DDL во всех своих новых HART-продуктах. Хост-устройства, поддерживающие DDL, смогут работать с любым из этих продуктов.

Фонд HART-коммуникаций поддерживает специальный архив описаний полевых устройств, в котором производители приборов могут регистрировать DDL-описания своих новых устройств. Фонд координирует также распространение DDL-описаний среди разработчиков хост-устройств, которые являются членами Фонда.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Bowden R. HART - Field communications protocol: A Technical Overview. 2nd edition. Fisher-Rosemount Ltd. 1999.
2. Романов В.Н., Соболев В.С., Цветков Э.И. Интеллектуальные средства измерений / Под ред. Э.И. Цветкова. М.: РИЦ “Татьянин день”. 1994.
3. ГОСТ Р 8.673-2009. Государственная система обеспечения единства измерений. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Основные термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2010. – 20 с.
4. Ицкович Э.Л. Современные интеллектуальные датчики общепромышленного назначения, их особенности и достоинства // Датчики и системы. 2002. № 2. С.42-47.
5. Трейн Р. ”Полевые системы” и развитая диагностика // Датчики и системы. 2002. № 4. С.53-56.
6. Нейджел Д.Дж. Беспроводные сети интеллектуальных датчиков // Датчики и системы. 2002. № 6. С.51-58.
7. Уикзер Дж. Соединяемость: интеллектуальные датчики или интеллектуальные интерфейсы // Датчики и системы. 2002. № 10. С.50-54.
8. Маркелов И.Г., Фетисов А.В., Кулик К.Е. Комплекс интеллектуальных датчиков давления Метран-100 // Практика приборостроения. 2003. № 4. С.48-51.
9. Корнова Т.Л., Саинский И.В. Коммуникационная технология HART для автоматизации технологических процессов // Практика приборостроения. 2003. № 4. С.77-83.
10. Корнова Т.Л. HART-протокол и другие коммуникационные технологии, применяемые в России // Датчики и системы. 2004. № 6. С.41-48.
11. Половинкин В. HART-протокол // Современные технологии автоматизации. – 2002, №1. – С.6-14.
12. Pinceti P. Fieldbus: more than a communication link // IEEE instrumentation & measurement magazine. March 2004. Vol. 7. №1. Pp. 17-23.
13. Pereira J.M.D. A Fieldbus prototype for educational purposes // IEEE instrumentation & measurement magazine. March 2004. Vol. 7. №1. Pp. 24-31.

Полезные ссылки на сайты Интернета

<http://www.hartcomm.org> - официальный сайт Фонда HART-коммуникаций. Содержит технические обзоры, спецификации HART-протокола, архивы DDL-описаний полевых устройств, ссылки на сайты производителей HART-продуктов, форумы и др.

<http://www.romilly.co.uk> - весьма полезный сайт Ромилли Боудена – известного в Англии и во всем мире популяризатора HART-систем.

<http://www.rosemount.com> – один из сайтов компании Rosemount, являющейся первым разработчиком HART-протокола.

<http://www.fieldbus.org> – официальный сайт Fieldbus Foundation – Фонда полевых коммуникаций Fieldbus.

<http://www.analogservices.com> - сайт компании Analog Services Inc., на котором содержатся различные технические рекомендации по применению устройств, поддерживающих HART-протокол.

<http://www.alibaba.com/suppliers/hart-supplier.html> - ресурс со списком поставщиков HART-продукции (преимущественно китайских).

http://www.asupp.ru/standarts/FLD/HART_tech.pdf - техническое описание HART-протокола на русском языке на портале по АСУ ТП.

<http://www.metrان.ru> – сайт промышленной группы “Метран” - российского производителя интеллектуальных устройств, поддерживающих HART-протокол.

http://www.elemer.ru/po/hart_config.php - сайт российской компании "Элемер", содержащий ссылку на скачивание программы для настройки приборов по HART-протоколу

Наиболее известные производители HART-продукции

1) Корпорация **Emerson** (США), в которую в настоящее время в качестве подразделений входит множество известных компаний, таких как **Rosemount** (интеллектуальные датчики температуры, давления, расхода, уровня, различных параметров жидкостей и газов), **Fisher** (электрозадвижки и другие технологические регуляторы), **Micro Motion** (приборы для измерения массового расхода и плотности).

<http://www2.emersonprocess.com>

2) **KROHNE Messtechnik GmbH** (Германия) – датчики уровня и расхода.

<http://www.krohne.com>

3) **HACH LANGE GmbH** (Германия) – аналитические технологические приборы.

<http://www.hach-lange.com>

4) **Endress+Hauser** (Швейцария) – очень широкий спектр HART-продукции: датчики давления, расхода, уровня, различных параметров жидкостей и газов, модемы, коммутаторы и др.

<http://www.endress.com>

5) **Mettler-Toledo GmbH** (Швейцария) – электрохимические датчики.

<http://www.mt.com>

6) **Siemens AG** (Германия) – широкий спектр HART-продукции: датчики давления, расхода, уровня, позиционеры, модемы, коммутаторы, программное обеспечение.

<http://support.automation.siemens.com>

7) **Yokogawa Electric Corp.** (Япония) – датчики давления, расхода, температуры, коммутаторы, программное обеспечение.

<http://www.yokogawa.com>

8) **Harold Beck & Sons Inc.** (США) – исполнительные технологические устройства.

<http://www.haroldbeck.com>

Российские производители:

9) Промышленная группа **“Метран”** (г. Челябинск) – крупнейший российский производитель интеллектуальных устройств, поддерживающих HART-протокол (датчики давления, температуры, расхода, коммутаторы).

<http://www.metran.ru>

10) НПП **"Элемер"** (г. Москва) – датчики давления, влажности и температуры.

<http://www.elemer.ru>

11) СКБ **"Промавтоматика"** (г. Москва) – устройства согласования различных интерфейсов с HART-протоколом.

<http://www.skbpa.ru>

12) ОАО **"Теплоприбор"** (г. Рязань) – преобразователь давления **"Сапфир-22МР-Н"** .

<http://www.teplopribor.ru>

13) ЗАО **"РУСТ-95"** (г. Москва) – электропневматические позиционеры.

<http://www.roost.ru>

14) ЗАО **"Эмикон"** (г. Москва) – модули мультиплексирования HART-каналов.

<http://www.emicon.ru>

Хронология версий HART-протокола

Версия	Год выхода	Основные нововведения
2	1986	Первая официальная спецификация. Команды с #0 по #6, с #33 по #48.
3	1987	Новая команда #49.
4	1988	Улучшена поддержка устройств, способных выдавать несколько переменных. Статус защиты от записи. Опциональное расширение кода типа устройства. Новые команды с #50 по #56.
5.0	1989	Длинный формат транзакции, уникальный идентификатор устройства. Пакетный режим. Команды с #4 по #5 заменены блоком команд #12..#18. Новые команды #11..#19, #57..#59, #108..#112. Улучшено описание протокола на уровнях 1 и 2 модели OSI.
5.1	1990	Поддержка устройств с несколькими выходными аналоговыми сигналами, в том числе неточковыми. Новые команды #60..#70, #107.
5.2	1993	Обновлено описание протокола на уровне 1 (физический уровень рассмотрения модели OSI)
6.0	2001	Длинное поле тэга (32 символа). Улучшена поддержка устройств, выдающих несколько переменных. Более богатые возможности описания статуса устройства и переменной. Специфичные команды для семейств устройств, в диапазоне с #1024 по #33791. Передача блоков данных. Новые команды #7, #8, #20..#22, #71..#75, #79..#83, #106, #111, #112. Многие команды расширены, для многих изменены спецификации с целью большей ясности описания. В описании на уровне 1 OSI опционально введен новый способ модуляции аналогового сигнала – C8PSK, в котором каждый символ представлен периодом синусоиды 3200 Гц с одним из 8 дискретных значений фаз, что обеспечивает скорость передачи 9600 бод, или 10 транзакций в сек.
6.4	2004	16-битный идентификатор фирмы-производителя.
7.0	2007	Введение беспроводного HART - WirelessHART™ . Новые общепотребительные команды #77, #84..#104, #512, #513. Новые специальные команды беспроводного HART: #768..#1023. Многие команды расширены. Тренды данных. Новый тип данных: time. Агрегация команд. Расширена статусная информация. Команды #38 и #48 стали универсальными.
7.1	2008	Редакторские правки документа.

ФЕТИСОВ Владимир Станиславович

**ПРОТОКОЛ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА
HART
В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ
СИСТЕМАХ**

Учебное издание

Подписано в печать 12.12.11. Формат 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать плоская.

Гарнитура Times New Roman.

Усл. печ. л. 5,3. Усл. кр.-отт. 5,3. Уч.-изд. л. 5,2.

Тираж 200 экз. Заказ № 11

ООО НПФ "ФОТОН"

450000, г.Уфа-центр, а/я 1527

Отпечатано в ООО "Господин Оформитель"

450076, г.Уфа, ул. Султанова 24/1



ISBN 978-5-9903144-1-2



9 785990 314412