



Виктор Половинкин

## HART-протокол

Целью данного обзора является первичное ознакомление с HART-протоколом. В статье также рассматриваются средства описания, параметрирования и подключения HART-устройств нижнего уровня АСУ ТП.

Стандарт для передачи аналоговых сигналов значениями тока в диапазоне 4-20 мА известен уже несколько десятков лет и широко используется при создании систем АСУ ТП, в химической промышленности, теплоэнергетике, в пищевой и многих других отраслях промышленности. Традиционно для измерения различных физических величин (давления, объема, температуры и т.д.) предлагается множество приборов с токовым выходом 4-20 мА. Достоинством данного стандарта является простота его реализации, массовое использование в приборах и возможность помехоустойчивой передачи аналогового сигнала на относительно большие

расстояния. Однако при создании нового поколения интеллектуальных приборов и датчиков потребовалось наряду с передачей аналоговой информации передавать и цифровые данные, соответствующие их новым расширенным функциональным возможностям.

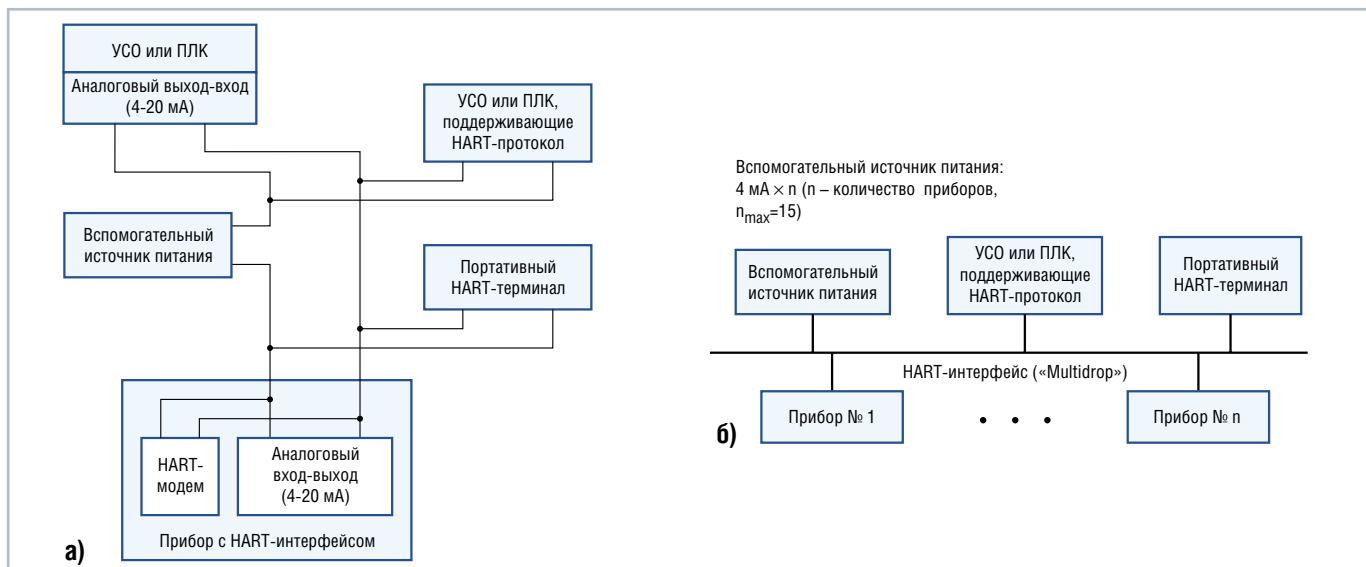
В середине 80-х годов американская компания Rosemount разработала протокол Highway Addressable Remote Transducer (HART). В начале 90-х годов протокол был дополнен и стал открытым коммуникационным стандартом [1]. Вначале он был нормирован только для применения в режиме соединения «точка-точка», затем появилась возможность применять протокол в режи-

ме многоточечного соединения («multidrop»). Основные технические параметры, определяемые стандартом на HART-протокол, представлены в табл. 1.

### СИСТЕМНОЕ ПОДКЛЮЧЕНИЕ И ТОПОЛОГИЯ

HART-протокол используется в двух режимах подключения.

В большинстве случаев применяется соединение «точка-точка» (рис. 1 а), то есть непосредственное соединение прибора низовой автоматики (преобразователя информации, датчика, исполнительного устройства и т.п.) и не более чем двух ведущих устройств. В



Условные обозначения: ПЛК — программируемый контроллер; УСО — устройство связи с объектом; ПК — персональный компьютер.

Рис. 1. Структурная схема подключения HART-устройств:

а) стандартный вариант — цифровой канал «точка-точка» с аналоговым сигналом;

б) многоточечный вариант — цифровой канал (топология-шина) без передачи аналогового сигнала, но с удаленным питанием по цепям связи

Таблица 1. Технические параметры, определяемые стандартом на HART-протокол

<b>Топология</b>	«Точка-точка» (стандартная) или шина
<b>Максимальное количество устройств</b>	Одно подчиненное устройство и два ведущих устройства (стандартный режим); 15 подчиненных устройств, 2 ведущих устройства (многоточечный режим с удаленным питанием)
<b>Максимальная протяженность линии связи</b>	3 км (стандарт); 100 м (многоточечный режим)
<b>Тип линии</b>	Экранированная витая пара
<b>Интерфейс</b>	4-20 мА, токовая петля (аналоговый)
<b>Скорость передачи</b>	1,2 кбит/с
<b>Метод обращения</b>	Polling (механизм опроса с уникальной адресацией каждого устройства)
<b>Максимальная длина пакета данных</b>	0-25 байт
<b>Время цикла обновления данных</b>	Около 500 мс (в пакетном режиме — 330 мс)
<b>Надежность передачи данных</b>	1 ошибка на $10^5$ бит, контроль по четности каждого байта, байт контрольной суммы для каждого пакета
<b>Возможность использования во взрывоопасной зоне</b>	Да

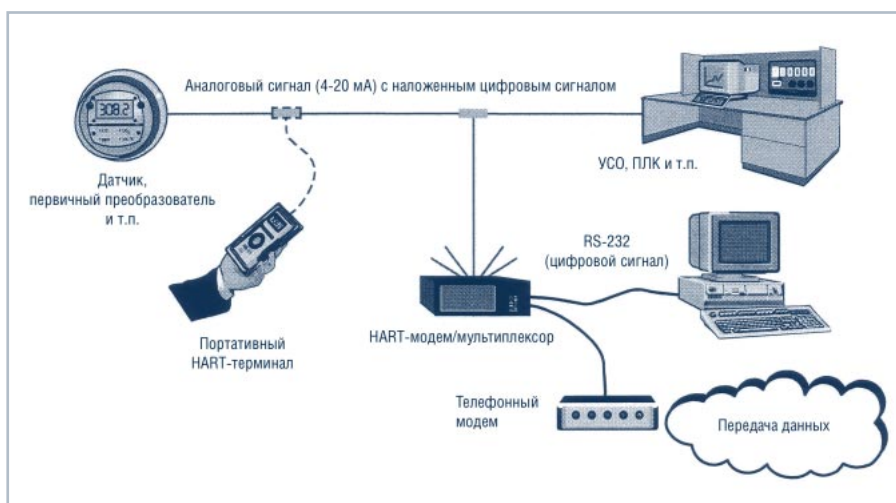


Рис. 2. Типовые HART-компоненты и схема их подключения

качестве первичного ведущего устройства, как правило, используется устройство связи с объектом (УСО) или программируемый логический контроллер, а в качестве вторичного — портативный HART-терминал или отладочный ПК с соответствующим модемом. При этом аналоговый токовый сигнал передается от ведомого прибора к соответствующему ведущему устройству. Цифровые сигналы могут приниматься или передаваться как от ведущего, так и от ведомого устройства. Так как цифровой сигнал наложен на аналоговый, процесс передачи аналогового сигнала происходит без прерывания.

В многоточечном режиме (рис. 1 б) до 15 ведомых устройств (slave) могут соединиться параллельно двухпроводной линией с теми же двумя ведущими устройствами (master). При этом по линии осуществляется только цифровая связь. Сигнал постоянного тока 4 мА обеспечивает вспомогательное пита-

ние ведомых приборов по сигнальным линиям. Типовые HART-компоненты и схема их подключения показаны на рис. 2.

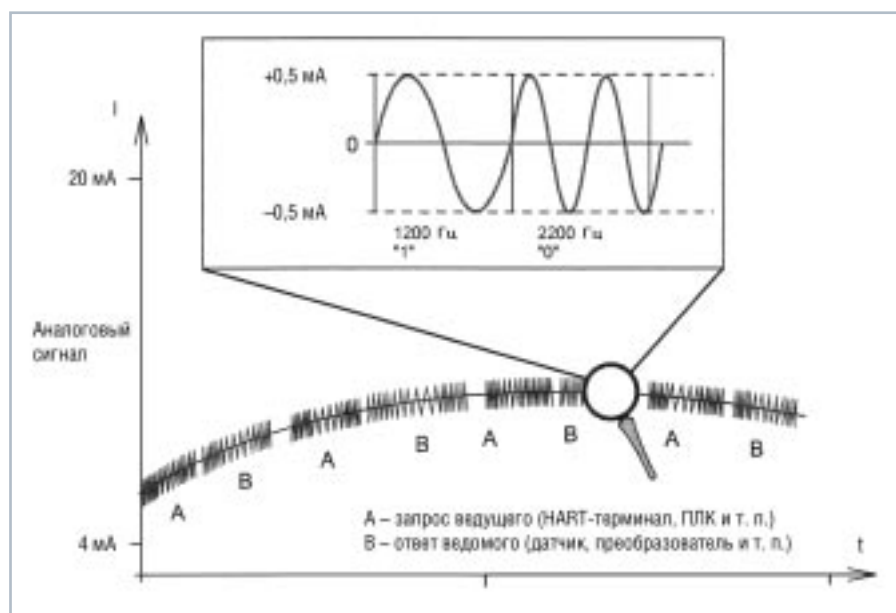


Рис. 3. Кодирование HART-сигнала

## МЕТОД ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

HART-протокол основан на методе передачи данных с помощью частотной модуляции (Frequency Shift Keying, FSK), в соответствии с широко распространенным коммуникационным стандартом Bell 202. Цифровая информация передается частотами 1200 Гц (логическая 1) и 2200 Гц (логический 0), которые накладываются на аналоговый токовый сигнал (рис. 3). Частотно-модулированный сигнал является двухполярным и при применении соответствующей фильтрации не влияет на основной аналоговый сигнал 4-20 мА. Скорость передачи данных для HART составляет 1,2 кбит/с. Каждый HART-компонент требует для цифровой передачи соответствующего модема.

Благодаря наличию двух ведущих устройств каждое из них может быть готово к передаче через 270 мс (время ожидания). Цикл обновления данных повторяется 2-3 раза в секунду в режиме запрос/ответ и 3-4 раза в секунду в пакетном режиме. Несмотря на относительно большую длительность цикла, в большинстве случаев он является достаточным для управления непрерывными процессами.

Важнейшим условием для передачи HART-сигналов является то, что нагрузка в общей цепи коммуникационного канала должна быть в пределах 230...1100 Ом. В противном случае возникает несоответствие допустимым значениям параметров сигнала (табл. 2). Нагрузка в основном определяется омической составляющей входного импеданса управляющей систе-

мы или портативного HART-терминала. Наряду с омической следует принимать во внимание индуктивную и ёмкостную составляющие входного импеданса как самого ведущего устройства, так и используемого кабеля, поскольку из-за них происходят задержки и затухание частотной составляющей HART-сигнала.

Для предотвращения недопустимого уровня искажения HART-сигнала максимальное ослабление сигнала HART-прибора должно быть не более 3 дБ на частоте 2500 Гц. Определение этой

**Таблица 2. Допустимые значения параметров HART-сигналов**

Тип устройства	Минимальная величина	Максимальная величина
Ведущее устройство/HART-терминал: передача сигнала	400 мВ	600 мВ
HART-прибор: передача сигнала	0,8 мА (при нагрузке цепи 230 Ом соответствует 184 мВ)	1,2 мА (при нагрузке цепи 1100 Ом соответствует 1320 мВ)
Ведущее устройство/HART-терминал, HART-прибор: прием сигнала	Допускается 120 мВ, сигналы менее 80 мВ игнорируются	Допускается 2 В

**Таблица 3. Типовые параметры некоторых кабелей**

AWG/сечение	Погонное сопротивление кабеля	Погонная ёмкость кабеля
14 AWG/2,09 мм <sup>2</sup>	18 Ом/км	150-200 пФ/м
18 AWG/0,8 мм <sup>2</sup>	46 Ом/км	300-420 пФ/м
24 AWG/0,2 мм <sup>2</sup>	178 Ом/км	75-100 пФ/м

**Таблица 4. Типовая длина линий передачи HART-сигнала в зависимости от типа кабеля при соединении «точка-точка»**

Исполнение двухпроводной линии	Неэкранированная	Экранированная, витая, многожильный проводник	Экранированная, витая, одножильный проводник
Сечение проводника	24 AWG/0,2 кв. мм	24 AWG/0,2 кв. мм	20 AWG/0,5 кв. мм
Длина линии	«Короткая линия» (длина ограничена внешними факторами)	До 1500 м	До 3000 м

из минимального допустимого значения сигнала, приведенного в табл. 2. Далее устанавливает-

ся системная константа, значение которой должно быть менее 65 мкс. В простейшем случае она определяется последовательным сопротивлением и параллельной ёмкостью цепи. Приблизительный расчёт максимальной длины линии связи при условии использования данной константы, а также с учётом влияния параметров кабеля (табл. 3) можно выполнить по следующей формуле:

$$L_{\max} = \frac{65 \cdot 10^{-6}}{RC} - \frac{C_f + 10000}{C}$$

Здесь  $L_{\max}$  — максимальная длина кабеля, м;

$R$  — сопротивление (нагрузка, сопротивление кабеля, внутреннее сопротивление Ex-барьера), Ом;

$C$  — погонная ёмкость кабеля, пФ/м;

$C_f$  — максимальная внутренняя ёмкость HART-прибора, пФ.

Для передачи HART-сигнала могут применяться любые двухпроводные кабели. В зависимости от их исполнения и параметров допускается различная длина линии. Представленные в табл. 4 значения длины линий соответствуют обычному соединению «точка-точка». При многоточечном режиме работы допустимая длина линий будет значительно меньше (табл. 5). Это объясняется, в первую очередь, тем, что в данном случае суммируется параллельная ёмкость всех подключенных HART-приборов.

## РЕАЛИЗАЦИЯ HART-ПРОТОКОЛА

HART-протокол реализует уровни 1, 2 и 7 эталонной модели ISO/OSI-стандарта (табл. 6). Дополнительно протокол предусматривает надстройку к уровню 7 в форме HART Device Description Language (см. соответствующий раздел статьи).

При реализации уровня 1 HART-протокол опирается на хорошо известный стандарт Bell 202. Таким образом, аппаратно он ориентирован на так называемые Bell- или HART-модемы. На уровне 2 реализуется протокол передачи данных, который использует принцип «ведущий-ведомый» (master-slave). Ведущими могут быть, например, портативный HART-терминал или ПЛК. Активное ведущее устройство передает соответствующую HART-команду на ведомое HART-устройство (как правило, приборы низовой автоматике). Запрашиваемое HART-устройство интерпретирует со-

**Таблица 5. Типовая длина линий передачи HART-сигнала в зависимости от погонной ёмкости кабеля и топологии соединений**

Топология соединений	Погонная ёмкость кабеля		
	400 пФ/м	200 пФ/м	100 пФ/м
«Точка-точка»	600 м	1100 м	2000 м
Многоточечное: 10 HART-приборов, общая ёмкость 5000 пФ	500 м	900 м	1600 м
Многоточечное: 10 HART-приборов, общая ёмкость 22000 пФ	85 м	150 м	250 м

**Таблица 6. Уровни HART-протокола**

<b>Уровень 8 пользовательский</b>	Device Description Language (DDL)
<b>Уровень 7 прикладной</b>	HART-команды
<b>Уровень 2 канальный</b>	HART-протокол Структура пакета
<b>Уровень 1 физический</b>	Стандарт Bell 202

ответствующую команду и отвечает. Оба ведущих имеют различные адреса, что и гарантирует однозначность при обмене командами и ответами. Передача данных происходит асинхронно в полудуплексном режиме. Структура пакетов во всех режимах работы оди-

наковая, что создаёт однозначное соответствие между HART-командами и ответами устройств в многоточечном режиме. Различия существуют только между структурой запроса ведущего (HART-терминала или ПЛК) и структурой ответа ведомых устройств (рис. 4 а, б).

Все HART-сообщения передаются побайтно. Байт данных содержит стартовые и стоповые биты, а также бит паритета (рис. 4 в).

Надежность передачи данных по HART-протоколу обеспечивается различными мерами контроля как на уровне байта, так и на уровне пакета. Частота возникновения ошибки на уровне передачи битов составляет 1 ошибку на 10<sup>5</sup> бит. Каждый передаваемый байт внутри HART-пакета имеет бит паритета; каждый HART-пакет имеет контрольную сумму, с помощью

которой можно распознавать до 3 ошибочных битов.

Внутри уровня 7 протокол HART использует команды, которые подразделяются на три основных класса (табл. 7).

- **Универсальные команды.** Эти команды используются и поддерживаются всеми ведомыми приборами. Они служат решению таких общих задач, как, например, считывание первичных значений измерений, диапазона измерений, граничных величин или констант. Имеется 10 таких команд.
- **Стандартные команды.** Они используются в большинстве HART-приборов, но не во всех. К этой группе принадлежат прежде всего такие команды, как считывание и запись стандартных и приборных параметров (например, *Установить фиксированное значение выходного тока*).
- **Специфические команды устройств.** Эти команды содержат функции, которые ограничиваются данной моделью или типом прибора. К ним относятся команды, связанные с настройкой, вводом в эксплуатацию или работой специфических приборов (например, *Калибровка ультразвукового датчика* или *Считывание базовых данных прибора*).

**СРЕДСТВА ОПИСАНИЯ, ПАРАМЕТРИРОВАНИЯ И ПОДКЛЮЧЕНИЯ HART-УСТРОЙСТВ**

Введение Device Description Language (DDL) — языка описания устройств — позволило различным производителям единообразным способом описывать параметры и правила управления своими HART-устройствами. Описание на языке DDL выполняется в текстовом формате, а затем переводится компилятором в описание устройства в двоичной форме (DD). Полученный двоичный образ HART-уст-

PA	SD	AD	CD	BC	DT 0...25 байт	CHK
----	----	----	----	----	-------------------	-----

а)

PA	SD	AD	CD	BC	ST	DT 0...25 байт	CHK
----	----	----	----	----	----	-------------------	-----

б)

Стартовый бит 0	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	Бит паритета	Стоповый бит 1
--------------------	----	----	----	----	----	----	----	----	--------------	-------------------

в)

Условные обозначения: PA — преамбула; SD — признак старта; AD — адрес портативного HART-терминала; CD — HART-команда; ST — статус полевого устройства; BC — длина поля статуса и данных; DT — поле данных; CHK — контрольная сумма.

**Рис. 4. Структура HART-телеграммы: а) запрос от ведущего устройства; б) ответ от ведомого устройства; в) формат байта**

**Таблица 7. Команды HART-протокола**

Универсальные	Стандартные	Специфические команды устройств
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Read manufacturer and device type</li> <li>• Read primary variable (PV) and units</li> <li>• Read current output and percent of range</li> <li>• Read up to four pre-defined dynamic variables</li> <li>• Read or write 8-character tag, 16-character descriptor, date</li> <li>• Read or write 32-character message</li> <li>• Read device range values, units and damping value (time constant)</li> <li>• Read sensor serial number and limits</li> <li>• Read or write final assembly number</li> <li>• Write polling address</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Read selection of up to four dynamic variables</li> <li>• Write damping time constant</li> <li>• Write device range values</li> <li>• Calibrate (set zero, set span)</li> <li>• Set fixed output current</li> <li>• Perform self-test</li> <li>• Perform master reset</li> <li>• Trim PV zero</li> <li>• Write PV units</li> <li>• Trim DAC zero and gain</li> <li>• Write transfer function (square root or linear)</li> <li>• Write sensor serial number</li> <li>• Read or write dynamic variable assignments</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Read or write low-flow cut-off</li> <li>• Start, stop, or clear totalized</li> <li>• Read or write density calibration factor</li> <li>• Choose PV (mass, flow or density)</li> <li>• Read or write materials or construction information</li> <li>• Trim sensor calibration</li> <li>• PID enable</li> <li>• Write PID set point</li> <li>• Valve characterization</li> <li>• Valve set point</li> <li>• Travel limits</li> <li>• User units</li> <li>• Local display information</li> </ul>

**Таблица 8. Специальное программное обеспечение для конфигурирования HART-устройств и создания систем управления**

Наименование программного обеспечения	Назначение	Производитель
Asset Management Solutions (AMS)	Конфигурирование и калибровка	Fisher-Rosemount
SIMATIC PDM	Конфигурирование, диагностика, параметрирование	Siemens
SIMATIC PCS7	Управление	Siemens
PACTware	Конфигурирование, диагностика	Группа компаний-производителей HART-устройств (Pepperl+Fuchs, Buerkert, SAMSON, Endress-Hauser и др.) и провайдеров ПО
IBIS	Конфигурирование	EB Hartmann&Braun
CONFIG	Конфигурирование	Krohne
H-View	Конфигурирование и сбор данных	Arcom Control Systems



**Примеры интеллектуальных HART-устройств фирмы Siemens**

ройства может быть загружен, например, в портативный HART-терминал или в ПК, где соответствующее прикладное программное обеспечение (ПО), предназначенное для конфигурирования и наладки HART-устройств, прочтя этот образ, сможет настроиться на работу с соответствующим устройством. Можно сказать, что описание на языке DDL является своего рода «драйвером» HART-устройства, который ко всему прочему программно совместим с любым прикладным ПО, предназначенным для работы с HART-протоколом.

Многие фирмы-производители HART-устройств предлагают специальное программное обеспечение как для их конфигурирования, так и для их встраивания в систему управления (табл. 8). Оно позволяет использовать в полной мере возможности современных интеллектуальных датчиков и исполнительных механизмов, а также обеспечивает их удобное конфигурирование и диагностику.

Данная таблица отображает неполный перечень таких продуктов, и автору хотелось бы кратко остановиться на наиболее популярных из них, в частно-

сти, на продуктах фирм Siemens и Pepperl+Fuchs.

SIMATIC PDM (Process Device Manager) предназначен для проектирования, параметрирования, ввода в эксплуатацию и диагностики интеллектуальных устройств нижнего уровня АСУ ТП. Данное программное обеспечение позволяет с помощью одного продукта работать с множеством разнообразных низовых устройств с единым стандартным набором функций управления, что обеспечивает существенное снижение затрат пользователя.

SIMATIC PDM может использоваться в двух видах:

- в качестве автономного ПО на персональном компьютере с операционной системой Windows 95/98/NT;
- как дополнение к системе проектирования и программирования SIMATIC S7, основанной на языке программирования STEP 7.

Другими словами, SIMATIC PDM может интегрироваться в систему управления SIMATIC PCS7.

Как уже отмечалось, для описания приборов используется Device Description Language (DDL). Этот язык стандартизован, не зависит от производи-

теля и очень широко распространен. Он описывает параметры, характеристики и функционирование HART-устройств. Через эти описания все устройства вне зависимости от их происхождения могут интегрироваться с SIMATIC PDM.

Для SIMATIC PDM постоянно изготавливаются DD приборов различных производителей, актуальный список которых можно найти в Интернете по адресу: [www.feldgeraete.de](http://www.feldgeraete.de)

Дополнительно SIMATIC PDM предоставляет возможности наблюдения на экране рабочей станции за процессом, отображения выбранных величин, сигналов тревоги и состояния низового устройства.

Обычно полевые устройства фирмы Siemens имеют на выбор коммуникационные интерфейсы PROFIBUS-DP, PROFIBUS-PA или интерфейс с HART-протоколом.

Приборы с HART-интерфейсом могут подключаться различными способами (рис. 5):

- через удаленное УСО SIMATIC ET200M с модулями HART,
- через HART-модем, с помощью которого устанавливается соединение

«точка-точка» между ПК или рабочей станцией и HART-устройством (рис. 2),

- через HART-мультиплексоры.

HART совместимые мультиплексоры являются идеальным средством для пользователя в случае соединения большого количества HART-устройств. Они решают задачу каскадирования, то есть наращивания числа коммутируемых каналов, и поддерживают оба режима работы HART-протокола: одноточечный с обеспечением передачи аналогового и цифрового сигнала и многоточечный для передачи только цифровых сигналов. В качестве интерфейса между мультиплексорами и управляющей системой или ПК могут использоваться RS-232, RS-485 и Ethernet.

HART-мультиплексор может использоваться в распределенной системе управления для выделения частотной составляющей (цифровой информации) HART-сигнала из линий связи, несущих смешанный сигнал. Это возможно при включении мультиплексора параллельно линиям связи между HART-устройствами и контроллерами ввода-вывода, использующими анало-

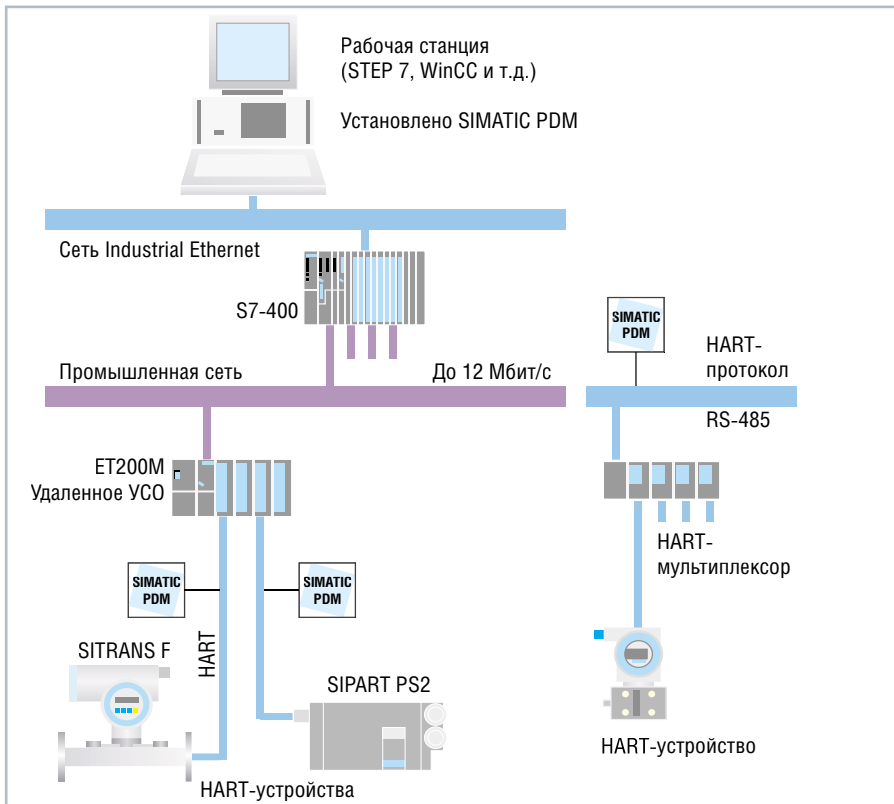
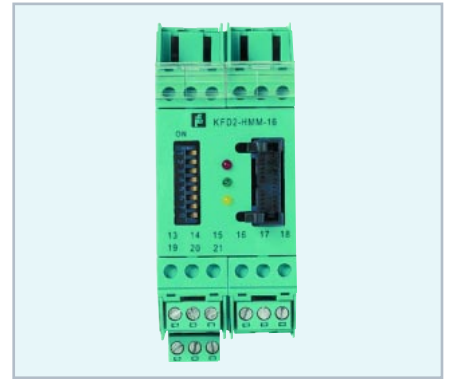


Рис. 5. Коммуникации в автоматизированной системе на базе оборудования фирмы Siemens

говый сигнал. Цифровой HART-сигнал на выходе мультиплексора далее может быть преобразован при помощи

шлюзовых устройств (gateway) в форму, соответствующую другим стандартным промышленным сетям. При использо-



HART-мультиплексор (master) серии K фирмы Pepperl+Fuchs для монтажа на силовую направляющую Power Rail

вании контроллеров со встроенной (интегрированной) системой ввода-вывода, таких, например, как SIMATIC ET200M или SIMATIC ET200iS, выход на промышленную сеть обеспечивается изначально (рис. 6).

При выборе HART-мультиплексора, помимо названных технических параметров, следует обратить внимание на возможность работы в пакетном режиме передачи данных, а также на число каналов, оснащенных HART-модемом. В качестве системы ввода-вывода HART-мультиплексор может включать

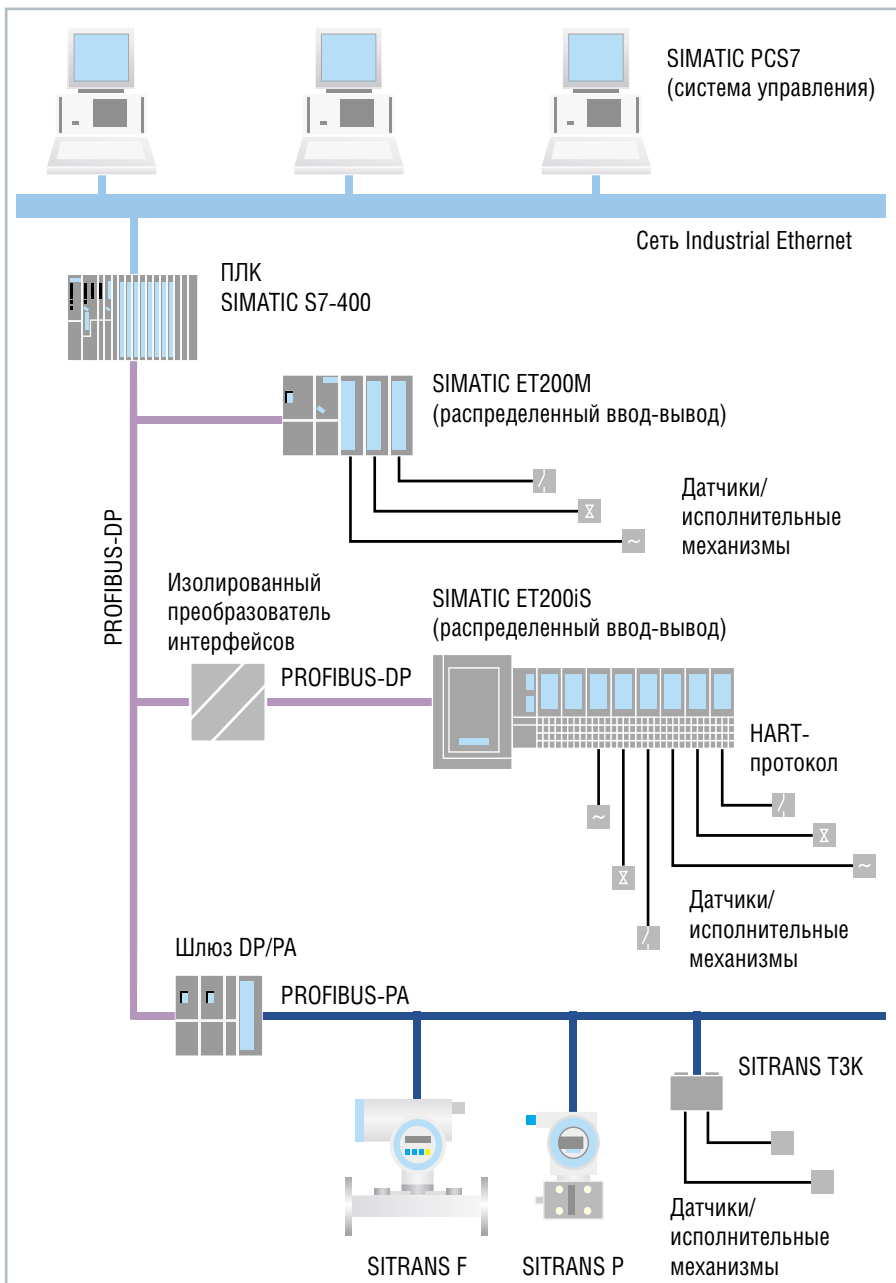


Рис. 6. Пример подключения устройств через децентрализованные периферийные устройства фирмы Siemens

в себя встроенные барьеры искробезопасности с гальванической развязкой. Примером такого устройства является 32-канальный мультиплексор MUX 2700A с интерфейсом RS-485 (рис. 7) фирмы Elcon, входящей в состав концерна Pepperl+Fuchs.

Для решения задач, аналогичных решаемым SIMATIC PDM, группой немецких производителей средств низовой автоматки во главе с фирмой Pepperl+Fuchs предлагается открытый пакет Process Automation Configuration



Рис. 7. 32-канальный HART-мультиплексор MUX 2700A с интерфейсом RS-485

Tool (PACTware) с открытым FDT-интерфейсом (Field Device Interface). Этот интерфейс между конфигуратором и драйвером низового устройства базируется на стандарте, разработанном ассоциацией немецких производителей электроники и электротехники (ZVE) и организацией PNO, объединяющей пользователей промышленной сети PROFIBUS. Впервые появляется возможность конфигурировать и параметризовать разнообразные приборы с помощью одного инженерного инструмента независимо от производителя прибора и используемой промышленной сети. Вы можете постоянно расширять в PACTware свой индивидуальный каталог низовых устройств, импортируя описание (Device Description, DD) любого прибора. Пакет предлагает различные функции для упрощения создания документации по вашему оборудованию, для графического представления трендов кривых или для архивирования измеряемых величин и определения пороговых уровней. ПО PACTware независимо от типа промышленной сети и в настоящий момент поддерживает PROFIBUS, ModBus, ControlNet, Ethernet, FF и HART-протокол. Подробнее с данным продуктом можно ознакомиться на сайте [www.pactware.com](http://www.pactware.com)

### СТАНДАРТИЗАЦИЯ

HART-протокол является открытым; он поддерживается и распространяется специально созданной организацией HART Communication Foundation (HCF). Данная международная организация объединяет как пользователей, так и производителей HART-устройств, а также координирует все работы, связанные с популяризацией и дальнейшим развитием HART-протокола. Она распространяет соответствующую литературу и имеет банк данных с описаниями HART-приборов самых различных производителей для DDL ([www.hartcomm.org](http://www.hartcomm.org)). ●

### ЛИТЕРАТУРА

1. W Kriesel, T. Heimbold, D. Telschow. Bus technologies für Automation.— Heidelberg: Hüthig, 2000.

**Автор — сотрудник  
фирмы ПРОСОФТ  
Телефон: (812) 325-3790  
Факс: (812) 325-3791  
E-mail: [polovinkin@spb.prosoft.ru](mailto:polovinkin@spb.prosoft.ru)**