



ОСОБЕННОСТИ КАБЕЛЕЙ ДЛЯ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ

SPECIFIC FEATURES OF CABLES FOR AUTOMATION SYSTEMS

A.V. Lobanov, *Cand. Sc. (Engineering), Full Member of the Academy of Electrotechnical Sciences of the RF, General Developer, Ltd. NPP "Spetskabel";*

V.V. Bychkov, *Head of Industry Standardization Bureau Ltd. NPP "Spetskabel"*

А.В. Лобанов, *канд. техн. наук, действительный член Академии электротехнических наук РФ, генеральный конструктор, ООО НПП «Спецкабель»;*

В.В. Бычков, *начальник Бюро отраслевой стандартизации, ООО НПП «Спецкабель»*

Аннотация. Современные промышленные предприятия отличаются наличием четырёхуровневой системы управления: 4-й уровень – система планирования ресурсов, 3-й уровень – система управления производственным процессом, 2-й уровень – система управления технологическими процессами, 1-й уровень – полевой, уровень первичных преобразователей. Связь на 4-ом и 3-ем уровнях осуществляется по оптическим кабелям и кабелям с медными жилами для структурированных кабельных систем. Связь на 2-ом уровне осуществляется по кабелям с медными жилами для структурированных кабельных систем, а для подключения программируемых логических контроллеров применяется специализированный кабель.

Для подключения объектов 1-го уровня разработаны и применяются несколько систем автоматизации возрастающей сложности: «токовая петля 4–20 мА», «HART протокол», системы со скоростью передачи информации 31,25 кбит/с, такие как «Profibus-PA» и «Foundation™ fieldbus», «RS-485», в стадии апробации системы, основанные на технологии Ethernet. Для систем автоматизации «токовая петля 4–20 мА» и «HART протокол» связь осуществляется по любым низкочастотным кабелям, для систем автоматизации «Profibus-PA» и «Foundation™ fieldbus» связь осуществляется по кабелям, работоспособным в диапазоне частот до 39 кГц, для систем автоматизации «RS-485» связь с полевыми устройствами осуществляется по кабелям, работоспособным в диапазоне частот от 10 до 100 МГц, для систем автоматизации, основанных на технологии Ethernet, по кабелям для структурированных кабельных систем категории 5 и выше. ООО НПП «Спецкабель» серийно выпускает кабели с медными токопроводящими жилами для всех уровней системы управления и всех систем автоматизации 1-го уровня управления.

Ключевые слова: четырёхуровневая система управления, кабели монтажные для систем автоматизации, «токовая петля 4–20 мА», «HART протокол», «Profibus-PA», «Foundation™ fieldbus», «RS-485», технология Ethernet

Abstract. Modern industrial enterprises have a four-level management system: the 4th level is the resource planning system, the 3rd level is the production process management system, the 2nd level is the process control system, the 1st level is the field level, the level of primary converters. The communication at the 4th and 3rd levels is carried out via optical cables and cables with copper cores for structured cable networks. The communication at the 2nd level is carried out via cables with copper cores for structured cable networks, and a specialized cable is used to connect the programmable logic controllers.

For the connection of the 1st level objects several increasingly complex automation systems have been developed and used: "current loop 4–20 mA", "HART protocol", systems with an information transfer rate of 31.25 Kbit/s, such as "Profibus-PA" and "Foundation™ fieldbus"; "RS-485", and systems based on the Ethernet technology are being tested.

For the automation systems the "current loop 4–20 mA" and the "HART protocol" the communication is carried out via any low-frequency cables, for the automation systems "Profibus-PA" and "Foundation fieldbus" the communication is carried out via cables operating in the frequency range up to 39 kHz.

For the automation systems “RS-485” the communication with the field devices is carried out via cables operating in the frequency range from 10 MHz to 100 MHz.

For the automation systems based on the Ethernet technology the communication is carried out via cables for structured cable networks of category 5 and higher.

The NPP “Spetskabel” produces copper core cables for all levels of the control system and all automation systems of the 1st level of control.

Key words: four-level control system, connecting cables for automation systems, “current loop 4–20 mA”, “HART protocol”, “Profibus-PA”, “Foundation™ fieldbus”, “RS-485”, Ethernet technology

*Материал поступил в редакцию 28.09.2023
Автор, ответственный за переписку: Бычков В.В.
E-mail: v.bychkov@spetskabel.ru*

Система автоматизации промышленного предприятия, как правило, представляет собой многослойную структуру.

Иерархия систем управления современным предприятием включает в себя 4 уровня, как это представлено на рис. 1 [1].

Наивысший 4-й уровень иерархии занимают системы ERP (Enterprise Resource Planning – система планирования ресурсов предприятия, где под ресурсами понимаются финансовые, материальные, сырьевые ресурсы и готовая продукция предприятия).

3-й уровень иерархии представляет собой MES-систему (Manufacturing Execution System – система управления производственным процессом). К задачам MES-систем относятся оперативное планирование производства, оптимизация производственных графиков, управление качеством и сроками поставок готовой продукции в режиме реального времени. Этому уровню соответствует также АСОДУ (автоматизированная система оперативно-диспетчерского управления) и АСКУЭ (автоматизированные системы контроля и управления энергоресурсами).

MES-системы относят к классу общепромышленных систем управления дискретными и непрерывными производствами в масштабе самостоятельного

подразделения (крупного цеха или завода в составе фирмы или корпорации). За счёт получения производственной информации в реальном масштабе времени и возможности мгновенной реакции на отклонения результатов производства от плановых показателей MES-системы позволяют оптимизировать производственный процесс. Поскольку в таких системах обрабатывается вся производственная информация, MES-системы связаны с ERP-системами. Связь в ERP-системах и MES-системах, а также связь между системами осуществляется с помощью технологии Ethernet с применением оптических кабелей и кабелей для структурированных кабельных сетей (LAN-кабелей), адаптированных к применению на объектах промышленного производства. Примером последних могут служить кабели типа СПЕЦЛАН® UTP (FTP, F/FTP и другие) по ТУ 16.К99-048–2012 и ТУ 16.К99-058–2014, и типа ЛОУТОКС® F/UTP, и другие по ТУ 16.К99-014–2004 производства ООО НПП «Спецкабель».

2-й уровень иерархии – это уровень АСУ ТП (автоматизированная система управления технологическими процессами) или DCS (Distributed Control System – распределённая система управления). Этот уровень иногда принято подразделять на два подуровня: диспетчерский (или SCADA-систем (Supervisory Control And Data Acquisition) – система сбора данных и оперативного диспетчерского управления) и контроллерный.

SCADA-системы имеют очень широкий спектр применимости от многофункциональных, предназначенных для применения в сложных системах управления крупными предприятиями до малых SCADA-систем с небольшим числом исполнительных модулей. К числу основных функций таких SCADA-систем относятся:

- сбор и обработка данных о параметрах процесса (фильтрация, нормализация, масштабирование, линеаризация и др. для приведения данных к нужному формату);
- хранение (архивирование) полученной информации в базе данных;



Рис. 1. Иерархия системы управления предприятием



- представление данных в цифровой, символьной или иной форме;

- сигнализация об изменениях в ходе технологического процесса, особенно в предаварийных и аварийных ситуациях в виде системы «алармов» (при этом может осуществляться регистрация действий обслуживающего персонала в аварийных ситуациях);

- формирование сводок, журналов и других отчетных документов о ходе технологического процесса на основе информации, собранной в архивах;

- формирование и сохранение в памяти команд оператора по изменению параметров настройки и режима работы контроллеров, исполнительных устройств (пуск-остановка, открытие-закрытие и другие функции);

- автоматическое управление ходом технологического процесса в соответствии с имеющимися в SCADA-системах алгоритмами управления (ПИ- и ПИД-регулирование, позиционное и нечеткое регулирование и т.п.). Данные функции рекомендуется использовать для решения задач невысокого быстродействия.

Контроллерный подуровень объединяет ПЛК (программируемые логические контроллеры), входящие в структуры различных систем управления. Контроллеры можно классифицировать по различным признакам (функциональным, конструктивным, объёму вычислительных ресурсов, числу каналов ввода-вывода и т.п.). Линии связи между объектами управления в зависимости от широты охватываемой территории и объёма передаваемой информации могут быть построены на оптических кабелях, кабелях для СКС, кабелях для подключения программируемых логических контроллеров (PLC) в распределённых системах управления (DCS) и кабелях симметричных для промышленных сетей связи.

В качестве примера кабелей для структурированных систем можно привести вышеупомянутые кабели типов СПЕЦЛАН® и ЛОУТОКС®, а для подключения логических контроллеров кабели типа КГ по ТУ 16.К99-012–2003, типа КАС по ТУ 16.К99-032–2007, типа КПА по ТУ 16.К99-023–2004 производства ООО НПП «Спецкабель».

1-й уровень (полевой) – это уровень первичных преобразователей (датчиков), исполнительных механизмов, малоканальных контроллеров, станций сбора данных.

Интересно проследить за совершенствованием кабелей, применяемых для подключения устройств автоматики 1-го уровня. Для подключения выносных устройств 1-го уровня вначале применялись аналоговые сигналы, а затем разработчики оборудования перешли к цифровым сигналам с постоянным ростом диапазона частот, в котором производилась передача информации.

Изначально устройства автоматики 1-го уровня выполнялись в виде выносных измерительных датчиков: вихревых, электромагнитных и ультразвуковых расходомеров, уровнемеров, датчиков измерения давления и вибрации, и ряда других [1].

Первое время специальных кабелей для подключения устройств автоматики не существовало: для дистанционного подсоединения датчиков с операторскими пунктами (диспетчерскими) использовались силовые кабели с сечениями токопроводящих жил (1,5–2,5) мм² или контрольные кабели.

Потом для дистанционного подсоединения устройств автоматики были разработаны монтажные кабели по ГОСТ 10348–80 [2]. У некоторых специалистов возникает вопрос: почему кабели для устройств автоматики стали называться монтажными? Обычно кабели получают название по области применения в отрасли промышленного производства. Например, кабели, предназначенные для передачи электроэнергии, получили название силовых кабелей, кабели, предназначенные для обеспечения связи, – кабелей связи. Автоматизация производства и развитие систем автоматического управления промышленностью имеют общеприменимый для всех отраслей промышленного производства характер. Такой же характер имеют и кабели, предназначенные для соединения объектов автоматики 1-го уровня между собой. Так как потребность в этих кабелях возникала в момент монтажа оборудования, насыщенного устройствами автоматики, такие кабели стали называться монтажными.

В зарубежных странах такие кабели называются по-английски «instrumental cable». В прямом переводе на русский язык слово «instrumental» относится только к музыкальным инструментам [3]. Из различных вариантов перевода наиболее близким можно считать слово «прибор». По смыслу, так как полевое устройство (датчик) иначе называется прибором, то название кабеля должно звучать как «кабель приборный». Но такое название в России не прижилось, а прижилось название «кабель монтажный».

Первой системой связи устройств автоматики с использованием монтажных кабелей была аналоговая система под названием «токовая петля 4–20 мА».

Как правило, датчики, независимо от контролируемого параметра, производят измерение напряжения. Самый простой способ передачи информации – аналоговый, когда по линии связи передаются те параметры, которые измеряются. Казалось бы, по линии связи должны передаваться сигналы, закодированные значениями напряжения. Но аналоговый сигнал может также передаваться закодированным значением электрического тока.

В системе на основе передачи сигналов, закодированных значениями напряжения, сигналы в

линии подвержены воздействию электромагнитных помех. Напряжение, создаваемое помехой «Упом», суммируется с выходным напряжением передатчика «Упер», поэтому на приёмной стороне их разделение весьма затруднительно. А в системе на основе передачи сигналов, закодированных значениями тока, любые отклонения выходного сигнала, в том числе и вызванные помехой, могут быть скомпенсированы на передающей стороне. Воздействие помехи в этом случае проявится в виде изменения напряжения на выходе передатчика на величину «-Упом», но ток в линии останется неизменным.

Это можно объяснить так: в системе на основе передачи сигналов, закодированных значениями напряжения, энергия помехи выделится на входе приёмника, где она причинит максимальный вред, а в системе на основе передачи сигналов, закодированных значениями тока, – на выходе передатчика, где эффект от её воздействия будет минимальным.

Поскольку падение напряжения на участке резистивной цепи пропорционально её сопротивлению, энергия помехи должна выделиться на участке, имеющем максимальное сопротивление. В системе на основе передачи сигналов, закодированных значениями напряжения, внутреннее сопротивление передатчика «Рпер» (источника напряжения), должно быть, как можно меньше, а приёмника (вольтметра) – как можно большим. В системе на основе передачи сигналов, закодированных значениями тока, всё наоборот: внутреннее сопротивление передатчика (источника тока) должно быть максимально большим, а приёмника (амперметра) – минимальным. Таким образом, теоретически (и практически) системы связи на основе токовой петли имеют больший уровень помехозащищённости, чем системы связи на основе передачи сигналов, закодированных значениями напряжения [4–6].

Наиболее широко применяется система автоматики токовая петля с рабочими значениями токов в диапазоне 4–20 мА. Изменение величины тока до значения менее 3,8 мА свидетельствует об обрыве линии, а выше 20,5 мА – о коротком замыкании. Это подтверждает ещё одно достоинство системы «токовая петля 4–20 мА» – она сама позволяет контролировать целостность физических соединений.

Как правило, система «токовая петля 4–20 мА» состоит из датчика, передатчика, кабеля (пары токопроводящих жил), приёмника и аналого-цифрового преобразователя. Блок-схема системы «токовая петля 4–20 мА» представлена на рис. 2.

Датчик измеряет физическое воздействие и вырабатывает на выходе напряжение, пропорциональное измеряемому параметру. Передатчик (усилитель тока, управляемый напряжением) преобразует напря-

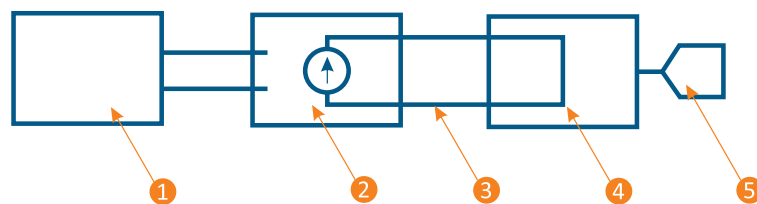


Рис. 2. Типовая блок-схема применения системы «токовая петля 4–20 мА»: 1 – датчик; 2 – передатчик; 3 – «токовая петля 4–20 мА»; 4 – приёмник; 5 – аналого-цифровой преобразователь

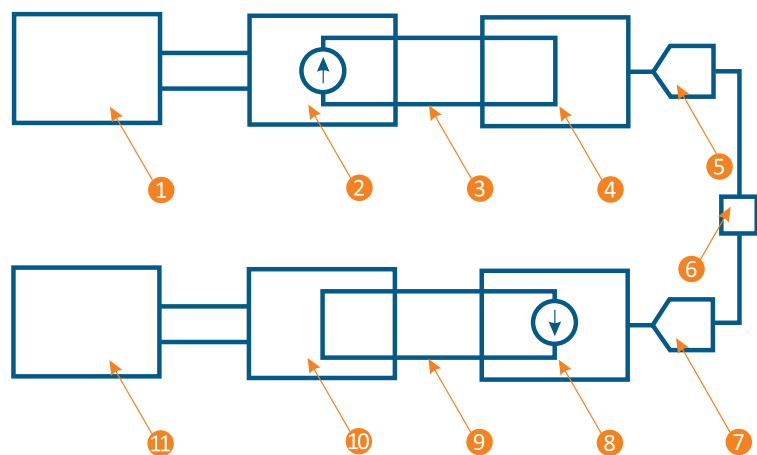


Рис. 3. Блок-схема комплексной системы с обратной цепью для управления исполнительным механизмом (приводом): 1 – датчик; 2 – передатчик; 3 – «токовая петля 4–20 мА»; 4 – приёмник; 5 – аналого-цифровой преобразователь; 6 – центр управления; 7 – цифро-аналоговый преобразователь; 8 – передатчик; 9 – «токовая петля 4–20 мА»; 10 – приёмник; 11 – исполнительное устройство (привод)

жение, поступающее от датчика, в соответствующий ток в диапазоне от 4 до 20 мА. Ток передаётся по паре изолированных токопроводящих жил кабеля к приёмнику. На другом конце кабеля приёмник (усилитель напряжения, управляемый током) преобразует поступающий ток в диапазоне 4–20 мА в напряжение. Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) оцифровывает выходное напряжение приёмника для последующей обработки процессором или микроконтроллером.

Если измерительный датчик совмещён с исполнительным устройством, которое предназначено для восстановления требуемых параметров, например, в случае их ухода, то применяется схема с использованием кабеля с двумя парами изолированных токопроводящих жил. Блок-схема системы двойной «токовой петли 4–20 мА» представлена на рис. 3.

Верхняя цепь, ведущая от измерительного датчика, работает так же, как вышеописанная по рис. 2. Оцифрованное на АЦП напряжение поступает в центр

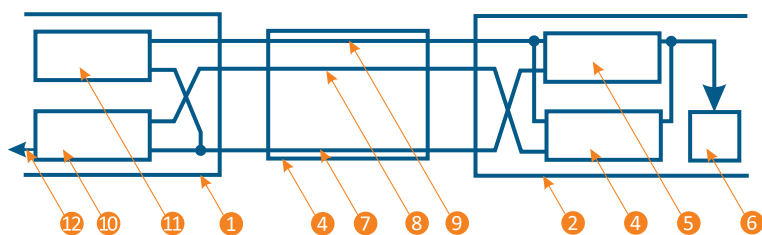


Рис. 4. Трёхпроводная версия «токовой петли 4–20 мА»:

1 – локальное оборудование; 2 – удалённое оборудование; 3 – трёхпроводный кабель; 4 – передатчик; 5 – стабилизатор; 6 – датчик; 7 – общая токопроводящая жила; 8 – жила передачи данных; 9 – жила электропитания; 10 – приёмник; 11 – источник электропитания (общий); 12 – информационный выход

управления, который вырабатывает в виде напряжения сигнал в цифровой форме, позволяющий изменить состояние исполнительного устройства. Цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) переводит сигнал из цифровой формы в аналоговую. В передатчике напряжение переводится в токовую посылку в диапазоне 4–20 мА. Ток от передатчика передаётся по токовой петле в приёмник, где ток опять трансформируется в напряжение и поступает в исполнительное устройство.

Если пару датчик-исполнительное устройство представляет пара расходомер-заслонка с электрическим приводом, то система работает следующим образом. Допустим, что в некоторый момент времени расходомер показывает некоторое увеличение расхода жидкого материала, поступающего по трубе. Датчик показывает изменение напряжения за счёт увеличения контролируемого параметра. Значение напряжения в передатчике преобразовывается в ток в диапазоне 4–20 мА и по токовой петле передаётся приёмнику. В приёмнике ток опять преобразовывается в напряжение, а в АЦП он переводится в цифровую форму. В центре управления он расшифровывается, как увеличение расхода, в связи с чем вырабатывается сигнал по напряжению в цифровой форме для управления приводом. Сигнал поступает в ЦАП, где преобразуется в аналоговую форму и поступает в передатчик. В передатчике напряжение переводится в ток и по токовой петле поступает в приёмник. В приёмнике ток преобразуется в управляющее напряжение, напряжение подаётся в привод, который производит смещение заслонки. Заслонка перемещается, сокращая отверстие для прохода жидкости в трубе. Количество перемещающейся по трубе жидкости уменьшается, и расход возвращается к нормируемому значению.

Отдельно стоит вопрос электропитания датчиков. Если речь идёт об электропитании маломощных измерительных узлов (примерно 10 мВт), то в линию достаточно встроить дополнительное сопротивление

500 Ом, и при протекании по нему тока от 4 до 20 мА на нём выделится необходимое напряжение. При этом на всё будет достаточно одной пары токопроводящих жил. Но если необходимо удалённо питать устройства, содержащие более мощные приборы, например, реле или жидкокристаллический экран с LED-подсветкой, то для этого необходимо будет выделить в кабеле отдельную пару жил. Но и здесь возможна экономия: если позволяют технические условия, возможен трёхпроводный вариант подключения датчика и источника электропитания, как показано на рис. 4.

Кабели, применяемые в системах автоматики «токовая петля 4–20 мА», обладают специфической особенностью: с одной стороны, они служат для передачи информационных сигналов автоматики, с другой стороны, они должны обеспечивать, хоть и не надолго, питание достаточно мощных исполнительных устройств (например, электродвигателей, перемещающих заслонку в процессе регулирования массопотока газообразного или жидкого материала, служащего сырьём для переработки). Информационные сигналы могут совмещаться с напряжением питания датчиков, передаваемых по одной паре токопроводящих жил. При этом напряжение может составлять до 12,6 В постоянного тока и до 8 В переменного тока частотой до 400 Гц без питания датчиков и, как правило, не более 25 В постоянного тока с питанием датчиков по информационной паре [7].

Для подключения мощных исполнительных устройств используют отдельную пару. При этом, как правило, используют сеть, существующую на предприятии с напряжениями 250; 300; 500; 660 В переменного тока частотой 50 Гц.

Так как заранее неизвестно, сколько и каких жил в кабеле должно быть рассчитано на напряжение питания исполнительных устройств, расчёт толщины изоляции в кабеле должен проводиться, исходя из условия обеспечения максимального напряжения (для питания исполнительных устройств).

Для системы автоматики «токовая петля 4–20 мА» могут применяться любые кабели парной или троичной скрутки, обеспечивающие требуемое напряжение питания исполнительных устройств. Из числа производимых ООО НПП «Спецкабель» можно рекомендовать кабели симметричные парной скрутки гибкие для систем безопасности и автоматизации огнестойкие типа «КСБ» по ТУ 16.К99-040–2009 и универсальные кабели парной и троичной скрутки типа «СКАБ®» для контрольно-измерительных приборов и аппаратуры по ТУ 16.К99-061–2016 на рабочие напряжения 250 и 660 В переменного тока частотой 50 Гц и по ТУ 16.К99-073–2015 на рабочее напряжение 1000 В переменного тока частотой 50 Гц.

Основным применением токовой петли с уровнями сигнала 4–20 мА являются промышленные системы автоматизации, в особенности, для применения во взрывоопасных зонах, для которых необходима высокая надёжность. Поэтому в них используется «смещённый ноль» (4 мА), чтобы успеть своевременно обнаружить неисправность системы управления и принять надлежащие меры для предотвращения возникновения аварийной ситуации.

Однако в процессе эксплуатации систем «токовая петля 4–20 мА» выявился серьёзный недостаток: система не позволяла осуществлять настройку датчика или получение информации о его состоянии, которые наиболее удобно передавать в цифровой форме.

С целью устранения этого недостатка, в 1980 году была разработана система цифрового обмена на базе системы «токовая петля 4–20 мА», получившая название «HART протокол» (Highway Addressable Remote Transducer – магистральный адресуемый удалённый преобразователь) [5, 8].

Аналоговая система «токовая петля 4–20 мА» была модернизирована таким образом, что получила возможность полудуплексного цифрового обмена данными. Для этого аналоговый сигнал «A(t)» суммируется с цифровым сигналом «D(t)» и полученная таким образом сумма передаётся с помощью источника тока 4 – 20 мА по линии связи. Схематическое изображение цифрового сигнала, наложенного на аналоговый сигнал, представлено на рис. 5.

Благодаря сильному различию диапазонов частот аналогового (0–10 Гц) и цифрового (1200 и 2200 Гц) сигналов, они легко могут быть разделены фильтрами низких и высоких частот в приёмном устройстве. При передаче цифрового двоичного сигнала логическая единица кодируется синусоидальным сигналом с частотой 1200 Гц, а ноль – 2200 Гц. При смене частоты

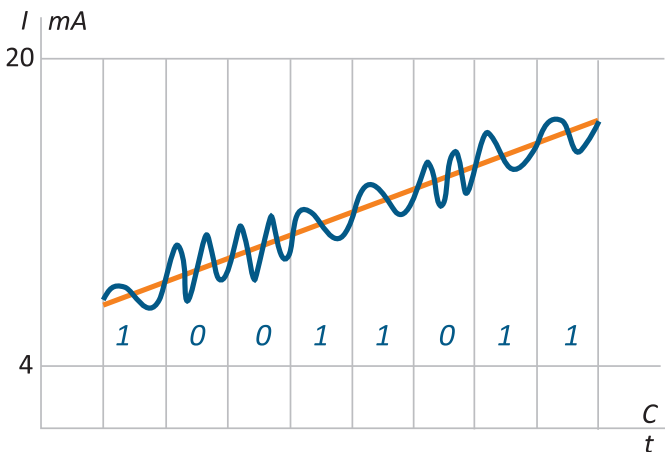


Рис. 5. FSK (Frequency Shift Keying – частотно-модулированный сигнал) поверх аналоговой токовой петли: 1 – аналоговый сигнал; 2 – цифровой сигнал

фаза колебаний остаётся непрерывной. Такой способ формирования сигнала называется частотной манипуляцией с непрерывной фазой.

Подобный вариант использования системы «HART протокол» относится к обмену информацией между двумя устройствами (типа «точка-точка») с наложением цифрового сигнала поверх аналогового. В частном случае система «HART протокол» (при наличии связи типа «точка-точка») может использовать только цифровой сигнал без аналогового или только аналоговый сигнал 4–20 мА без цифрового.

Однако в настоящее время использование пары токопроводящих жил для осуществления связи между двумя устройствами (типа «точка-точка») экономически невыгодно. Локальные участки вокруг установленного оборудования содержат примерно десять датчиков, для подключения которых экономически целесообразно использовать одну пару токопроводящих жил.

Более современным решением является применение системы «HART протокол» при объединении устройств в сеть (при наличии связи типа «точка-многоточка»). Для этого используют только цифровую часть системы «HART протокол» без аналоговой. А информация передаётся в виде тока, что позволяет соединять устройства «HART протокол» параллельно. Максимальное количество устройств в сети может составлять 15 штук, если не использовать HART повторители (ретрансляторы, репитеры). HART сеть может иметь произвольную топологию, поскольку при малых скоростях передачи (1200 бит/с) эффектов, характерных для длинных линий, не возникает.

В сети могут быть два ведущих устройства, одним из которых является контроллер, вторым – ручной коммуникатор, используемый для считывания показаний и установки параметров HART устройств, остальные – ведомые. В HART сети только один узел из ведущих может посылать сигнал, в это время остальные «слушают» линию. Иницирует процедуру обмена ведущее устройство (контроллер или ручной коммуникатор). Ведомые получают команду и посылают ответ на неё.

Для сечений токопроводящих жил кабелей, предназначенных для систем автоматизации по стандарту «HART протокол» введено следующее ограничение: при длине кабелей (линии связи) до 1500 м, сечение токопроводящих жил должно быть не менее 0,23 мм², при длине кабелей (линии связи) более 1500 м – сечение должно быть не менее 0,56 мм². Кабели для систем автоматизации «HART протокол» должны иметь коэффициент затухания не более 1 дБ/км на частоте 2,5 кГц на максимально допустимой длине линии равной 3 км. Допускается устанавливать норму на коэффициент затухания не более 1,5 дБ/км при максимально допустимой длине кабельной линии 2 км. Со



стороны систем автоматики «токовая петля 4–20 мА» и «HART протокол» к электрическим параметрам соединительных кабелей предъявляются одинаковые требования, поэтому для системы «HART протокол» можно рекомендовать те же кабели типов «КСБ» и «СКАБ®», расчёт толщин изоляции которых осуществляется на основании нормируемого напряжения.

К недостаткам HART сетей относится необходимость прокладки большого количества кабелей (к каждому полевому устройству свой кабель) и низкая скорость передачи (обычно 1200 бит/с [5], а при фазовой модуляции за счёт использования 8-позиционной манипуляции – до 9600 бит/с [4]). Нужно было разработать более оптимальную систему с большим числом полевых (ведомых) устройств, подключаемых к одной паре токопроводящих жил (шин).

Решение было найдено в форме магистральной полевой шины (fieldbus) с передачей цифровых сигналов. Как правило, ведущее устройство находится на одном конце шины, а полевые устройства (ведомые) концентрируются ближе к другому концу шины. Такие системы относятся к искробезопасным системам автоматики, работающим со скоростью передачи 31,25 кбит/с [9]. Из нескольких подобных систем можно выделить две, работающие по коммуникационным протоколам «Profibus-PA» и «Foundation™ fieldbus».

Обе системы искробезопасны и способны по одной и той же паре проводов (шине) передавать как данные, так и электропитание для подключённых к сети устройств, что позволяет использовать их во взрывоопасных зонах.

Обе системы могут быть использованы в качестве цифровой замены аналоговых каналов системы «токовая петля 4–20 мА» с использованием тех же самых уже существующих линий связи (кабелей).

Но есть между ними и существенные различия. Применяемая в «Profibus-PA» коммуникационная модель «главный – подчинённый» (ведущий – ведомый) делает её менее приемлемой, чем «Foundation™ fieldbus», которая создавалась не только для организации обмена цифровой информацией между управляющим устройством сети и устройствами нижнего уровня (полевого оборудования), но и для распределённого управления. Логика алгоритма управления «Foundation™ fieldbus» частично перенесена на нижний уровень системы управления (датчики и исполнительные механизмы) [10].

Существует несколько видов топологии – пространственного построения сетей систем автоматики, работающих со скоростью передачи 31,25 кбит/с: топология дерева (птичья лапка), топология ответвлений, комбинированная топология [11].

Топология дерева (птичья лапка), представленная на рис. 6, состоит из одного сегмента «fieldbus»,

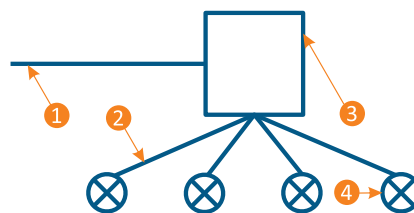


Рис. 6. Пример топологии дерева (птичья лапка):
1 – магистральная шина; 2 – ответвление; 3 – соединительная коробка; 4 – полевое устройство

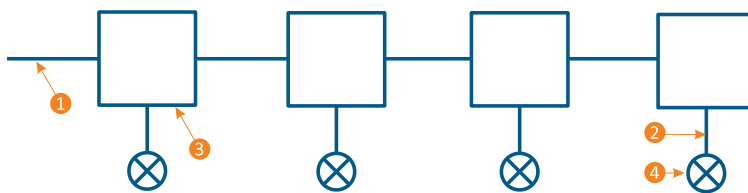


Рис. 7. Пример топологии ответвлений:
1 – магистральная шина; 2 – ответвление; 3 – соединительная коробка; 4 – полевое устройство

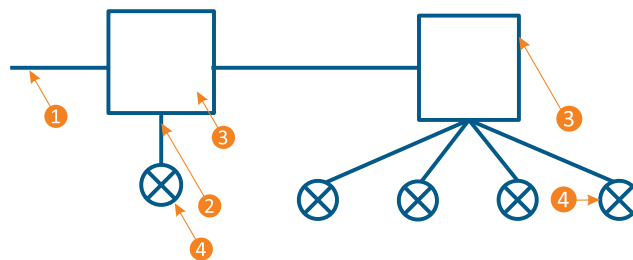


Рис. 8. Пример комбинированной топологии:
1 – магистральная шина; 2 – ответвление; 3 – соединительная коробка; 4 – полевое устройство

подключённого к соединительной коробке для формирования сети.

Данная топология может использоваться в конце магистрального кабеля (шины) в случае, если устройства одного сегмента территориально разбросаны, но находятся в области досягаемости одной соединительной коробки в пределах максимально допустимой длины ответвлений.

Топология ответвлений, представленная на рис. 7, состоит из полевых устройств, подключённых по длине магистральной шины по многоточечной схеме с помощью ответвлений.

Данная топология является технически вполне приемлемой, но обычно неэффективной с экономи-

ческой точки зрения. Она применяется, когда полевые устройства распределены по значительной территории с низкой плотностью (на значительном расстоянии друг от друга).

Комбинированная топология, представленная на рис. 8, состоит из группы полевых устройств, сконцентрированных на конце магистральной шины и подключённых по топологии дерева (птичьей лапки), а также отдельных полевых устройств, находящихся на значительном расстоянии от основной группы.

Важное значение имеет длина кабеля, используемого для ответвления. Причём необходимо учитывать, что ответвление производится только от магистральной шины, но не от других полевых приборов (ответвлений). В нормативной документации нормируются ответвления по-разному. Согласно [11] максимальная длина ответвления не должна превышать 200 м и уже при длине 100 м необходимо согласование с разработчиком системы. В [12] длина ответвлений нормируется до 120 м. Согласно [13] максимальная длина каждого ответвительного кабеля составляет 60 м для электрооборудования групп IIC и IIB при условии применения системы автоматики для взрывоопасных зон.

Мы сознательно не описывали пример топологии для связи «точка – точка», не отличающийся какой-либо сложностью.

Отдельно следует отметить топологию шлейфа. Такая топология представляет собой сегмент, в котором магистральная шина проходит от одного полевого устройства к другому, причём подключение выполняется на клеммах полевых устройств. Топологию шлейфа в сетях автоматики использовать нельзя, так как в ней не допускается добавление или удаление полевых устройств с сегмента без нарушения условий функционирования других полевых устройств. А также отказ одного полевого устройства повлияет на работу всех последующих по шине полевых устройств.

Сечение токопроводящих жил в кабелях, предназначенных для систем автоматики со скоростью передачи сигналов 31,25 бит/с, должно быть не менее 0,8 мм², при этом электрическое сопротивление постоянному току при температуре 20 °С должно быть не более 24 Ом на длине 1 км.

Индивидуальный экран пар в таких кабелях должен быть выполнен в виде оплётки из отожжённой медной проволоки с коэффициентом поверхностной плотности не менее 90 % [11].

Для кабелей, предназначенных для систем автоматики со скоростью передачи сигналов 31,25 кбит/с, предъявляются следующие дополнительные требования к электрическим параметрам [11]:

- ёмкостная асимметрия пар должна быть не более 4 нФ на длине 1 км при температуре 20 °С;

- волновое сопротивление на частоте 31,25 кГц должно быть равным 100 ±20 Ом;

- коэффициент затухания должен быть не более 3,0 дБ/км на частоте 39 кГц;

- максимальная задержка прохождения сигнала в кабелях должна быть не более 1,7 мкс/км.

На основании изложенных параметров разрабатывают оптимизированные монтажные кабели для систем автоматики «Profibus-PA» и «Foundation™ fieldbus», рассчитанные на работу с 32 полевыми устройствами. В качестве примера можно привести кабели симметричные для промышленных сетей «Profibus-PA» и «Foundation™ fieldbus» типа «КГ», выпускаемые по ТУ 16.К99-012–2003 ООО НПП «Спецкабель».

Выбор толщины изоляции кабелей и расчёт конструкции основаны на нормировании волнового сопротивления 100 ±20 Ом. При этом подача питания для мощных исполнительных устройств осуществляется отдельно по силовому кабелю.

Практика общения со специалистами – кабельщиками показала, что историю развития систем автоматики от системы «токовая петля 4–20 мА» к системе «HART протокол» и далее к системам «Profibus-PA» и «Foundation™ fieldbus», многие просто не понимают. Если систему «токовая петля 4–20 мА» относят к системам автоматики, то систему «HART протокол» и, тем более, разновидности системы передачи со скоростью 31,25 кбит/с, относят к чему угодно: системам передачи дискретной информации, связи, но только не к автоматике. Поэтому считаем целесообразным привести несколько цитат, которые подтверждают их внутреннюю связь.

Так, в техническом обзоре [12] фирмы Emerson Process Management (США) даётся следующая информация о системе автоматики «Foundation™ fieldbus»:

«Полевая шина «Foundation™ fieldbus» является полностью цифровой последовательной двунаправленной коммуникационной системой со скоростью обмена 31,25 кбит/с, с помощью которой обмениваются данными такие «полевые» (расположенные на объекте) устройства, как сенсоры, приводы и контроллеры.

Полевая шина «Foundation™ fieldbus» представляет собой локальную вычислительную сеть (ЛВС) для приборов, используемых в автоматическом управлении технологическим процессом, со встроенными возможностями распределения управляющих приложений по всей сети. Полевая шина сохраняет все достоинства аналоговых сигналов (4–20 мА), такие как:

- использование стандартного физического интерфейса с проводной сетью связи;

- подачи питания по шине на устройства, на одной проводной паре;

- обеспечение искробезопасности.



Из приведённой цитаты следует, что коммутационные системы со скоростью 31,25 кбит/с являются наследниками аналоговой системы «токовая петля 4–20 мА», использующими цифровую связь по магистральной шине (одной паре изолированных токопроводящих жил), позволяющими обслуживать до 32 ведомых устройств, подключаемых к одной магистральной шине (не учитывая возможности подключения системы ретрансляции).

Ещё одна цитата из рекомендаций по проектированию систем «Foundation™ fieldbus» [11]:

«Fieldbus – это система двустороннего полностью цифрового последовательного обмена данными, которая объединяет интеллектуальные полевые устройства и системы автоматизации «Foundation™ fieldbus», является локальной сетью (LAN – Local Area Network) устройств, используемых в автоматизации процессов со встроенной способностью распределять приложения управления по этой сети».

Из этой цитаты также видно, что система «Fieldbus» предназначена для обслуживания нескольких полевых устройств (до 32), каждое из которых ранее требовало для обслуживания свою систему «токовая петля 4–20 мА».

Целесообразно привести ещё одну цитату из этого документа:

«Все кабели должны представлять собой отдельно экранированные скрученные пары или многопарные кабели с отдельным экраном для каждой пары. Многопарные кабели также должны иметь общий экран».

Наличие экранов должно предотвратить проникновение извне (как от сторонних источников, так и от соседних пар) влияния в виде помех от электромагнитных полей.

Совершенствование систем промышленной автоматизации 1-го уровня происходит по двум направлениям: увеличение плотности элементов автоматизации на единицу площади (количество датчиков и исполнительных устройств) и увеличения частоты съёма информации с высокоскоростных датчиков, в случае, когда изменение состояния (контролируемого параметра) процесса происходит с очень высокой скоростью и необходимо своевременное изменение состояния процесса.

Использование в системах автоматизации, работающих со скоростью передачи цифровых сигналов 31,25 кбит/с, ретрансляторов (репитеров) позволяет обслуживать до 240 устройств, подключаемых к одной магистральной линии (с ретрансляторами) [11]. Такое решение позволило решить задачу увеличения количества подключаемых устройств (увеличения плотности устройств на единицу площади).

Для обеспечения построения более высокочастотных систем автоматизации потребовалась разработка

систем, работающих на более высоких скоростях передачи цифровых сигналов. Следующая разработка для промышленных сетей автоматизации получила название RS-485 (по стандарту EIA/TIA-485 США). Известен также (реже применяемый) вариант RS-422, имеющий незначительные отличия. RS-485 рассчитан на скорость передачи цифровых сигналов до 10 Мбит/с, с магистральной длиной линии связи 1200 м и максимальным количеством приёмо-передатчиков, равным 32 [14]. Система RS-485 является полудуплексным интерфейсом. Приём и передача идут по одной паре проводов с разделением по времени. В сети может быть много передатчиков, так как не участвующие в передаче отключаются в режиме приёма. В последнее время появилась система со скоростью передачи цифровых сигналов до 100 Мбит/с [14].

Для соединения приёмо-передающего оборудования в системе RS-485 разработан специальный кабель. Толщину изоляции и конструкцию кабеля рассчитывают на основании нормируемого волнового сопротивления 120 ± 12 Ом. ООО НПП «Спецкабель» производит кабели симметричные для промышленного интерфейса RS-485 типа «КИПЭ» по ТУ 16.К99-008–2001. Передача дистанционного питания по таким кабелям не предусмотрена.

С 70-х годов прошлого века для организации связи компьютерных сетей была разработана и успешно применяется до настоящего времени технология Ethernet. Начиная с 1983 года институтом IEEE США разрабатывается семейство стандартов для построения систем автоматизации, основанных на технологии Ethernet. Семейство технологий Ethernet для связи имеет следующие особенности:

- скорости распространения цифровых сигналов – 10; 100; 1000; 10000 Мбит/с;

- физическая среда для передачи данных – кабели симметричные для СКС, тонкий и толстый коаксиальный кабель; оптический кабель;

- особенности электропитания сети (PoE-мощность поверх Ethernet).

Кроме того, сети на основе технологии Ethernet имеют следующие дополнительные особенности:

- топологией сети может быть как шина, так и звезда;

- диапазон длин сегмента сети от 100 до 1000 м и более (для оптического кабеля);

- передаваемые сообщения могут адресоваться определённому узлу сети, выделенной группе узлов сети, всем узлам сети;

- каждый узел сети видит все сообщения, идущие от сети, и, если они адресованы данному узлу, то он отбирает их для обработки;

- в качестве протоколов разных уровней связи используется стек протоколов TCP/IP, который функционирует

онирует независимо от имеющегося варианта физической среды сети;

- важнейшей характеристикой сети Ethernet является используемый в ней случайный метод доступа любого узла к сети – множественный доступ с контролем несущей и с обнаружением столкновений.

Преимущество систем автоматизации, основанных на технологии Ethernet, состоит в том, что офисное оборудование также построено на технологии Ethernet, поэтому отсутствует необходимость в промежуточных устройствах согласования.

В то же время существует ряд недостатков применения технологии Ethernet для промышленных сетей:

- техническое оборудование сети Ethernet не приспособлено для работы в промышленных условиях: запылённости, влаги, взрывоопасности, производственных электромагнитных помех и т.п.;

- используемый в Ethernet метод случайного доступа не гарантирует доставку сообщений в необходимое время;

- Ethernet не имеет средства интерпретации доставляемого по сети сообщения (текст или число);

- надёжность передачи сообщений, контроль за возможностью их искажений или потерь отдельных бит не соответствует требованиям промышленных сетей [14].

В текущее время проводятся работы по модернизации сетей Ethernet с целью создания варианта промышленной серии Industrial Ethernet, способной конкурировать с типовыми промышленными сетями.

Сейчас уже выпускаются версии промышленных сетей, сочетающих протоколы промышленных сетей с протоколами сети Ethernet. Они используют в качестве порта физического уровня интерфейс RS-485, что соответствует сети Ethernet. Так появились сети Profinet, Foundation Field HSE (high-speed Ethernet – высокоскоростной Ethernet), Modbus/TCP и ряд других.

Обобщающий международный стандарт (публикация МЭК) с описанием подобных систем пока не издан. Однако общие требования к кабелям сформулированы в серии публикаций IEC 61156, на основании которых разработан отечественный стандарт ГОСТ Р 54429–2011 [15]. ООО НПП «Спецкабель» выпускает вышеупомянутые кабели для сети Ethernet типов СПЕЦЛАН® UTP (FTP, F/FTP и другие) по ТУ 16.К99-048–2012 и ТУ 16.К99-058–2014. Дистанционное питание в соответствии со стандартом IEEE 802/3bt (США) подаётся с напряжением не более 57 В одновременно с сигналами связи по тем же токопроводящим жилам [18].

В заключение проведём разграничение между кабелями сходными по областям применения: монтажными, контрольными, управления. Монтажные

кабели оптимизированы для работы с 32 полевыми устройствами и одним или двумя управляющими центрами, устанавливаемыми на одной паре (тройке) жил, конструктивной особенностью являются многопроволочные (преимущественно семипроволочные) токопроводящие медные или медные луженые жилы сечением от 0,35 до 6,0 мм², и применяются для систем промышленной автоматизации. Кабели производятся жильного, парного, троечного исполнений (жильное исполнение применяется для передачи потенциала).

Контрольные кабели предназначены для передачи электрических сигналов, в том числе сигналов информации в силовых сетях до 660 В переменного тока частотой до 100 Гц и постоянного тока до 1000 В и имеют только жильное исполнение. Жилы могут быть как однопроволочные, так и семипроволочные [16].

Кабели управления предназначены для передачи электрических сигналов управления малой мощности переменным и импульсным напряжением до 1000 В, частотой до 3 МГц и постоянным напряжением до 1400 В [17]. Сердечник кабелей управления скручивают из изолированных жил или групп жил, но требования к электрическим параметрам групп жил не предъявляют.

Из этого следует, что коренное отличие кабелей контрольных и управления от кабелей монтажных заключается в отсутствии исполнений с парной и троечной скруткой токопроводящих жил и оптимизации электрических параметров для этих исполнений.

Обобщая вышеизложенное, можно подвести итог: совершенствование промышленных сетей автоматизации достигло высокого уровня развития и не существует проблемных задач, решение которых представляло бы непреодолимые трудности.

Список источников

1. Ермоленко А.Д., Кашин О.Н., Лисицын Н.В. и др. Автоматизация процессов нефтепереработки / под общ. ред. Харазова В.Г. – С-Пб.: Профессия, 2015. – 304 с.
2. ГОСТ 10348–80. Кабели монтажные многожильные с пластмассовой изоляцией. Технические условия. – М.: Госстандарт, 1981.
3. Мюллер В.К. Полный англо-русский русско-английский словарь. – М.: Эксмо, 2015. – 1328 с.
4. Аналоговые полевые интерфейсы: «токовая петля 4–20 мА» – от простого к сложному // пресс-релиз фирмы «Компэл».
URL: <http://compel.ru/lib/976023> (дата обращения: 3.10.2023).
5. Чигарёв М. Интерфейсы токовой петли // Новости электроники. 2010. № 5. С. 15–18.



6. Справочник по средствам автоматики / Б.И. Филиппович, А.П. Шорыгин, В.А. Царьков и др. / под ред. Низэ В.Э., Антик И.В. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 504 с.

7. ГОСТ 26.011–80. Средства измерений и автоматизации. Сигналы тока и напряжения электрические непрерывные входные и выходные. – М.: Госстандарт, 1981.

8. **Денисенко В.** HART протокол: общие сведения и принципы построения сетей на его основе // СТА. 2010. № 3. С. 94–101.

9. International Standard for Use in Industrial Control Systems, Part 2: Physical Layer Specifications and Service Definition, IEC 61158-2–2003.

URL: http://webstore.iec.ch/p-preview/info_iec61158-2%7bed3.0%7Den.pdf (дата обращения: 10.09.2023).

10. **Ашок Гупта, Ричард Каро.** Foundation™ Fieldbus или Profibus-PA: выбор промышленной сети для автоматизации промышленных процессов // СТА. 1999. № 3. С. 16–20.

11. Рекомендации по проектированию систем Foundation™ Fieldbus.

URL: <http://www.fieldbus.org> (дата обращения: 28.09.2023).

12. Технический обзор Foundation™ Fieldbus // представлен Московским офисом Emerson Process Management.

13. ГОСТ Р МЭК 60079-27–2012. Взрывоопасные среды. Часть 27. Концепция искробезопасной системы полевой шины (FISCO) – М.: Стандартиформ, 2013. – 14 с.

14. **Ицкович Э.Л.** Перспективная автоматизация агрегатов предприятий технологических отраслей. – М.: Горячая линия – Телеком, 2018. – 543 с.

15. ГОСТ Р 54429–2011. Кабели связи симметричные для цифровых систем передачи. Общие технические условия. – М.: Стандартиформ, 2012. – 43 с.

16. ГОСТ 26411–85. Кабели контрольные. Общие технические условия. – М.: Издательство стандартов, 1986. – 13 с.

17. ГОСТ 18404.0–78. Кабели управления. Общие технические условия. – М.: Издательство стандартов, 1985. – 34 с.

18. What is Power Over Ethernet or POE?

URL: <https://www.everythingrf.com/community/what-is-power-over-ethernet> (дата обращения: 28.09.2023).

List of references

1. **Ermolenko A.D., Kashin O.N., Lisitsyn N.V. et al.** Automation of the oil refining processes / under the general editorship of Kharazova V.G. – S-Pb.: Profession, 2015. – 304 p.

2. GOST 10348–80. Plastic-insulated multi-core installation cables. Specifications – М.: Gosstandart, 1981.

3. **Muller V.K.** Complete English-Russian Russian-English Dictionary. – М.: Eksmo, 2015. – 1328 с.

4. Analog field interfaces: “current loop 4–20 mA” – from simple to complicated // press-release of Compel firm.

URL: <http://compel.ru/lib/976023> (date of the application: 3.10.2023).

5. **M. Chigarev.** Current loop interfaces // Electronics news. 2010. No 5. P. 15–18.

6. Handbook of automation equipment under the editorship of Nize V.E. and Antik I.V. – М.: Energoatomizdat, 1983. – 504 p.

7. ГОСТ 26.011–80. Measuring and automation devices. Input and output current and voltage continuous signals. – М.: Gosstandart, 1981.

8. **V. Denisenko.** HART protocol: general information and principles of building networks based on it // СТА. 2010. No 3. P. 94–101.

9. International Standard for Use in Industrial Control Systems, Part 2: Physical Layer Specifications and Service Definition, IEC 61158-2–2003.

URL: http://webstore.iec.ch/p-preview/info_iec61158-2%7bed3.0%7Den.pdf (date of the application: 10.09.2023).

10. **Ashok Gupta, Richard Karo.** Foundation™ Fieldbus or Profibus-PA: choice of the field network for the automation of industrial processes // СТА. 1999. No 3. P. 16–20.

11. Recommendations for the designing of Foundation™ Fieldbus systems.

URL: <http://www.fieldbus.org> (date of the application: 28.09.2023).

12. Technical review of Foundation™ Fieldbus // presented by the Moscow office of Emerson Process Management.

13. GOST R IEC 60079-27–2012. Explosive atmospheres. Part 27. Fieldbus intrinsically safe concept (FISCO). – М.: Стандартиформ, 2013. – 14 p.

14. **Itskovich E.L.** Promising automation of the equipment of technological industry enterprises. – М.: Hotline – Telecom, 2018. – 543 p.

15. GOST R 54429–2011. Symmetrical telecommunication cables for digital communication. General specifications. – М.: Стандартиформ, 2012. – 43 p.

16. ГОСТ 26411–85. Control cables. General specifications. – М.: Publishing house of standards, 1986. – 13 p.

17. ГОСТ 18404.0–78. Control cables. General specifications. – М.: Publishing house of standards, 1985. – 34 p.

18. What is Power Over Ethernet or POE?

URL: <https://www.everythingrf.com/community/what-is-power-over-ethernet> (date of the application: 28.09.2023).