

Любая система управления помимо электроники и исполнительных устройств включает в себя набор интерфейсов, с помощью которых происходит сопряжение всех её элементов в единое целое. Именно интерфейсы обеспечивают надёжное функционирование оборудования в реальных, порой весьма жёстких условиях. Анализ наиболее популярных аналоговых и цифровых способов обмена информацией с удалёнными элементами показывает, что многие из них основаны на использовании токовой петли (Current Loop). Благодаря простоте, высокой помехозащищённости и ряду других положительных качеств, токовая петля, особенно интерфейс 4–20 мА, заслуженно стала одной из самых распространённых основ для передачи информации на большие расстояния.

## Токовая петля

Режим работы участка электрической цепи (двухполюсника) определяется двумя основными параметрами: напряжением  $U$  – разностью потенциалов на его концах, и током  $I$ , протекающим через него. В общем случае связь между значениями  $U$  и  $I$  может быть достаточно сложной, однако в простейшем случае, – для резистора с сопротивлением  $R$ , – эти два параметра связаны законом Ома:  $U = I \times R$ .

Таким образом, при использовании на приёмной стороне резистора в качестве датчика входного сигнала, теоретически нет никакой разницы между способами передачи сигнала – с помощью напряжения или с помощью тока, ведь эти два параметра взаимосвязаны. Более того, с технической точки зрения передавать информацию с помощью напряжения проще, чем с помощью тока, ведь большинство существующих источников электрической энергии является источниками напряжения, да и приборов, в том числе и полупроводниковых, способных контролировать или регулировать напряжение, намного больше. Кроме этого, система, передающая информацию с помощью напряжения при бесконечно большом сопротивлении измерительного элемента ( $R \Rightarrow \infty$ ) практически не потребляет тока ( $I \Rightarrow 0$ ). Это означает, что теоретически она может быть намного экономичней, ведь в этом случае мощность сигнала  $P$ , а следовательно, и затраты энергии на его передачу могут быть сколь угодно малыми ( $P = U \times I \Rightarrow 0$ ).

Основным преимуществом токовой петли является высокая точность передачи информации. В реальной системе связи на величину напряжения сигнала на приёмной стороне влияют физические параметры линии, в первую очередь активное сопротивление её проводников  $R_{л1}$  и  $R_{л2}$  (рис. 1). Действительно, согласно второму закону Кирхгофа, сумма напряжений в замкнутом контуре должна быть равна нулю, поэтому напряжение  $U_{\text{вых}}$ , генерируемое передатчиком, равно сумме падений напряжений на сопротивлениях проводов линии связи  $U_{л1}$ ,  $U_{л2}$  и входном сопротивлении приёмника  $U_{\text{вх}}$ . Это означает, что для точной передачи сигнала, особенно аналогового, с помощью напряжения необходимо каждый раз подстраивать систему под конкретную линию связи. Учитывая, что активные сопротивления проводников  $R_{л1}$  и  $R_{л2}$  физической линии зависят от многих факторов, в первую очередь от температуры, такую настройку

необходимо проводить регулярно, в зависимости от времени суток и погодных условий.

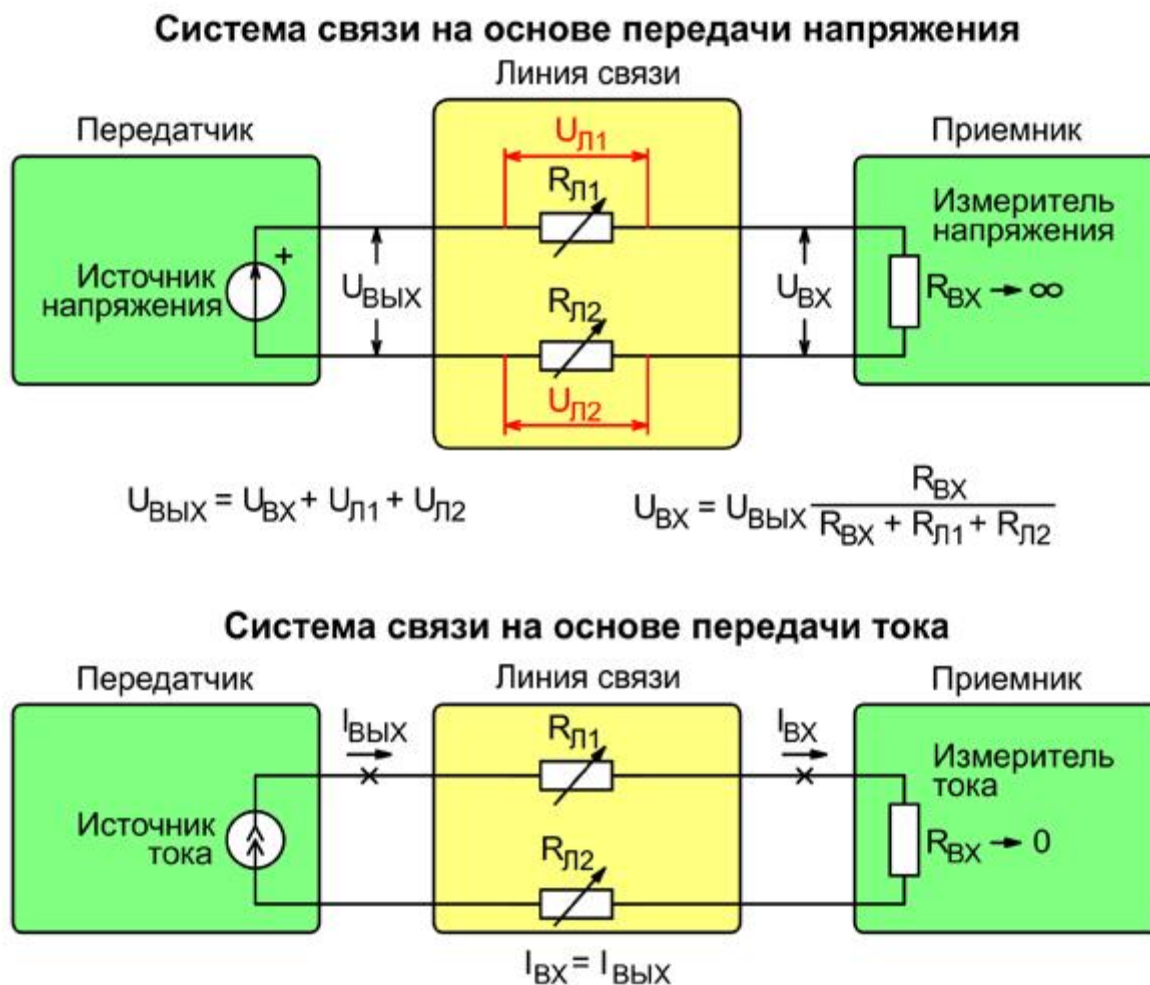


Рис. 1. Системы связи на основе передачи напряжения и тока

В отличие от напряжения, величина которого отличается для каждого участка, ток во всех элементах *неразветвленной* электрической цепи одинаков. Это означает, что качество передаваемой информации (силу тока) можно контролировать не только на приёмной, но и на передающей стороне, тем самым подстраиваясь под все изменения параметров линии. Таким образом, система передачи данных на основе токовой петли не требует каких-либо дополнительных инструментов калибровки или автоподстройки под конкретную линию связи – эту функцию автоматически выполняет передатчик.

Влияние параметров линии связи в системе, передающей информацию с помощью напряжения, теоретически можно уменьшить, увеличив внутреннее сопротивление приёмника (в идеальном случае  $R \Rightarrow \infty$ ). В этом случае произойдёт уменьшение тока в линии, а следовательно, и падение напряжения на сопротивлениях  $R_{\text{Л1}}$  и  $R_{\text{Л2}}$ . Однако при работе с длинными линиями это приведёт к ухудшению качества связи, поскольку кроме сигнала в системе существуют ещё и помехи.

Помеха является такой же неотъемлемой частью систем передачи данных как передатчик, приёмник и линия связи. В аналоговых системах наличие помех приводит к уменьшению соотношения «сигнал/шум», а в цифровых — к увеличению вероятности ошибки. В системе на основе передачи напряжения напряжение, создаваемое помехой  $U_{\text{пом}}$ , суммируется с выходным напряжением передатчика  $U_{\text{вых}}$  (рис. 2), поэтому на приёмной стороне их разделение весьма затруднительно. А вот в системе на основе передачи 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  $-U_{\text{пом}}$ , но ток в линии останется неизменным.

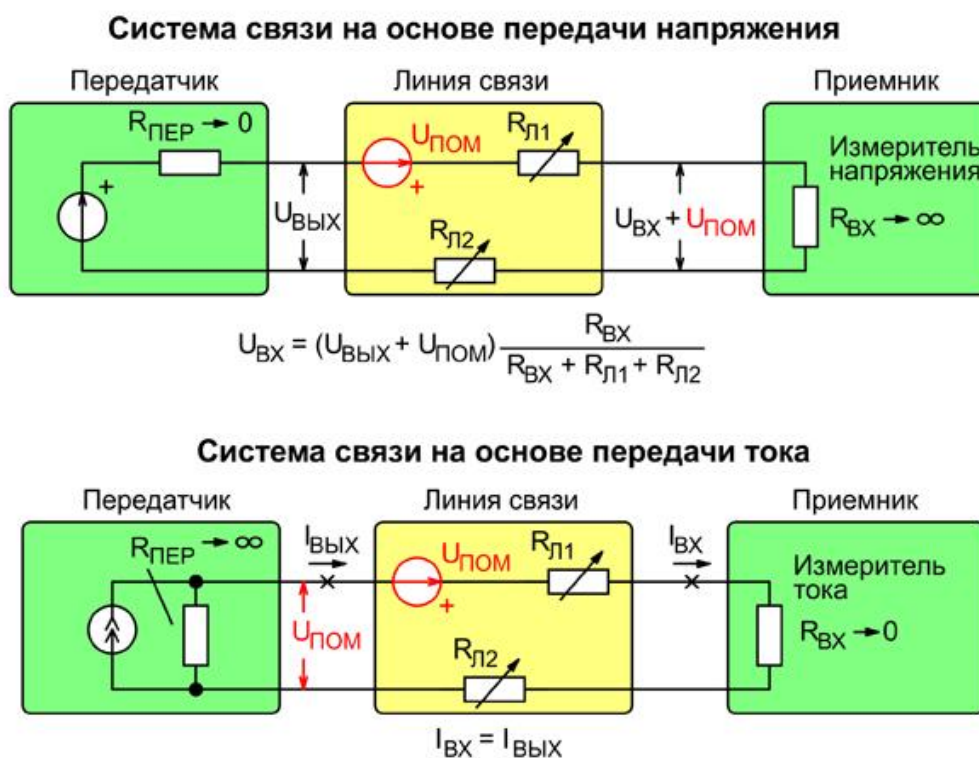


Рис. 2. Влияние помехи на различные системы связи

Это также можно объяснить иначе: в системе на основе передачи напряжения энергия помехи выделится на входе приёмника, где она причинит максимальный вред, а в системе на основе передачи тока – на выходе передатчика, где эффект от её воздействия будет минимальным. Действительно, поскольку падение напряжения на участке резистивной цепи пропорционально её сопротивлению, энергия помехи должна выделиться на участке, имеющем максимальное сопротивление. В системе на основе передачи напряжения внутреннее сопротивление передатчика  $R_{\text{ПЕР}}$  (источника напряжения) должно быть как можно меньше, а приёмника (вольтметра) – максимально большим.

В системе на основе передачи тока все 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

большой уровень помехозащищённости, чем системы связи на основе передачи напряжения.

## **Интерфейс 4-20 мА**

В основе интерфейса 4-20 мА лежит токовая петля с рабочими значениями токов в диапазоне 4...20 мА. Изменение значения тока до значения менее 3,8 мА свидетельствует об обрыве линии, а выше 20,5 мА – о коротком замыкании. Таким образом, этот интерфейс позволяет контролировать целостность физических соединений в системе.

В общем случае логическое соответствие уровней тока может быть любым, однако традиционно малый уровень соответствует низкому уровню контролируемой величины, а большой – высокому.

### **Основные преимущества интерфейса 4-20 мА**

- простота – в самом простейшем случае удалённое устройство можно подключить с помощью всего двух проводов;
- высокая точность передачи сигнала – поскольку ток одинаков во всех элементах системы передачи, передатчик всегда знает, какой уровень сигнала получит приёмник;
- высокая помехозащищённость за счёт двойного контроля тока (и на стороне передачи, и на стороне приёма), позволяющая подключать удалённые (порой до десятков километров) объекты, например, с помощью стандартных телефонных линий;
- независимость качества связи от длины линии, которая влияет только на максимальную скорость передачи данных;
- возможность самодиагностики как обрыва, так и короткого замыкания линии;
- теоретически неограниченная дальность связи – фактически максимальная длина соединительного кабеля ограничена лишь электрической прочностью его изоляции и скоростью передачи данных.

Все это привело к широкому распространению данного интерфейса на практике, особенно в промышленных системах, и поддержке большим количеством производителей, что является ещё одним, пожалуй, самым главным его преимуществом.

Однако, как и любой другой интерфейс, токовая петля имеет ряд недостатков и ограничений, на которые следует обратить внимание при разработке. Основным из них является возможность передачи по одному кабелю только одного сигнала. При большом количестве устройств это может стать проблемой, поскольку кроме увеличения количества кабелей могут возникнуть нежелательные паразитные контуры в цепи заземления, что негативно скажется на помехоустойчивости системы. Также при большом количестве одновременно используемых интерфейсов необходимо уделять

особое внимание качеству и состоянию кабелей, поскольку все преимущества токовой петли исчезают при нарушении изоляции передающих линий.

Ещё одним недостатком токовой петли является относительно низкая скорость передачи информации, напрямую зависящая от длины линии. В отличие от систем на основе передачи напряжения, для которых скорость перезаряда паразитной ёмкости кабеля можно повысить, например, увеличением мощности передатчика, выходной ток передатчика для токовой петли не должен превышать 20 мА. Пусть в системе связи используется типовой кабель с погонной ёмкостью, равной 75 пФ/м. В этом случае отрезок линии длиной 1 км будет иметь ёмкость 75 нФ. Пусть входное сопротивление приёмника равно 250 Ом, что при выходном токе 20 мА обеспечивает напряжение на входе приёмника 5 В. В этом случае для заряда паразитной ёмкости линии до такого напряжения потребуется около 18,5 мкс. Нетрудно подсчитать, что максимальная скорость передачи в этом случае не может превышать 54 кбит/с, и она будет пропорционально уменьшаться по мере увеличения длины кабеля. В реальных системах скорость передачи данных по интерфейсу 4-20 мА обычно не превышает 9600 кбит/с. Тем не менее, для большинства систем управления этого оказывается вполне достаточно.

### **Основные узлы интерфейса 4-20 мА**

В идеальном случае для создания информационного сигнала следовало бы использовать специализированный управляемый генератор тока. Однако технически оказалось проще разделить функции электропитания и формирования сигнала и использовать в системе два отдельных узла: источник питания, обеспечивающий систему электрической энергией, и управляемый стабилизатор тока, выполняющий функцию генератора (передатчика) сигнала. Это позволило:

- подключить приёмопередающую часть системы к стандартным шинам питания (9 В, 12 В, 24, 36 В и т.д.);
- гибко выбирать необходимый уровень рабочего напряжения;
- избавиться от привязки источника электрической энергии к передающему узлу.

При таком подходе источник питания для приёмопередающей части в общем случае может находиться в любой части системы: как в локальном, так и в удалённом оборудовании, а также подключаться в виде отдельного устройства непосредственно в разрыв кабеля линии связи (рис. 3).

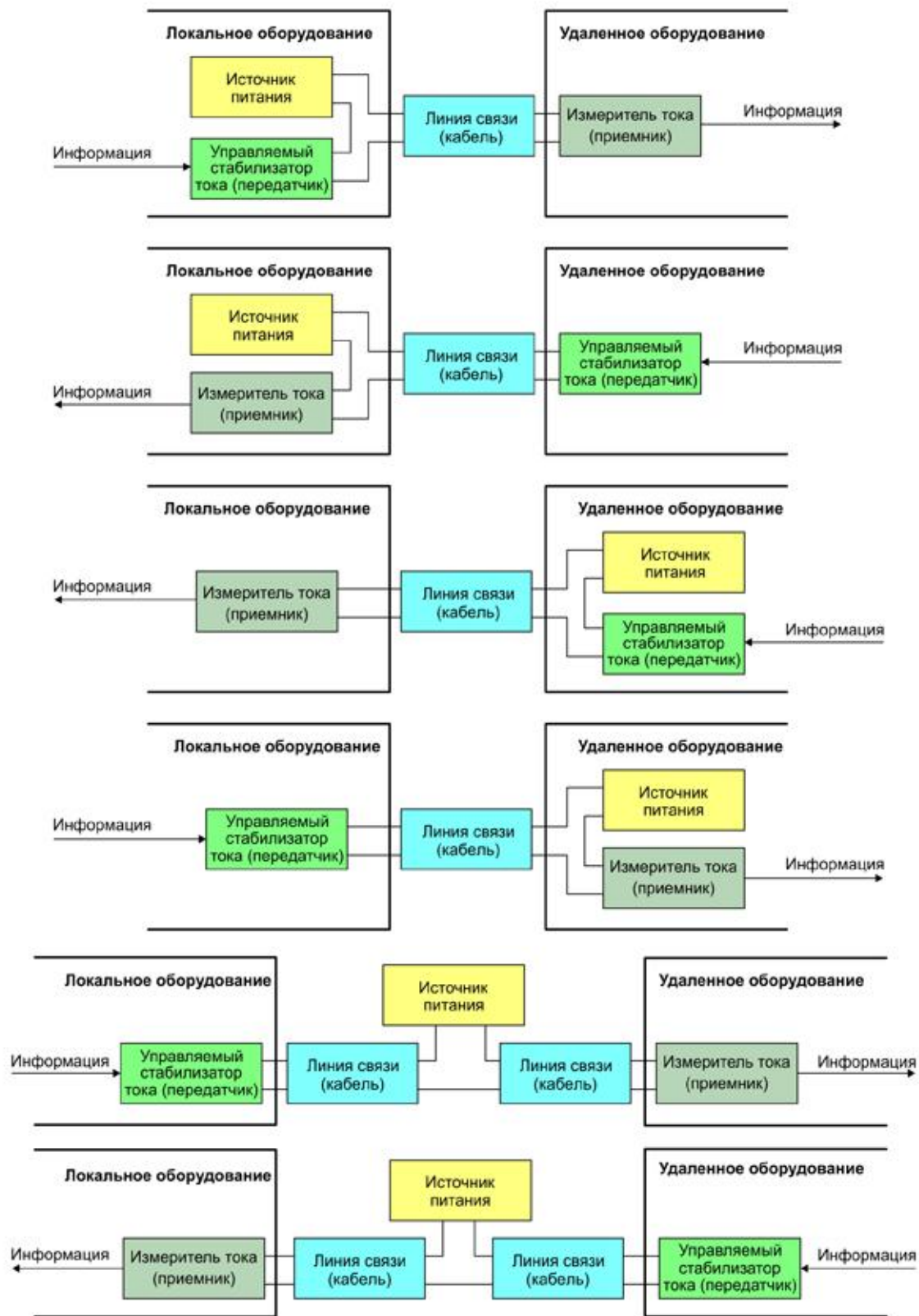


Рис. 3. Варианты построения системы связи на основе интерфейса 4-20 мА

Напряжение питания приёмопередающей части зависит от падения напряжения в линии связи. Чем длиннее линия связи и чем тоньше провод, тем выше должен быть этот параметр. Для объектов, расположенных на значительном расстоянии, напряжение питания может достигать 120 В и более.

В целом напряжение источника питания должно быть приблизительно на 10% больше общего падения напряжения на всех элементах приёмопередающего тракта при максимальном токе (20 мА). Если напряжение питания будет ниже, то из-за высокого сопротивления контура управляемый стабилизатор тока просто не сможет обеспечить нужный ток. Повышенное же значение этого параметра в худшем случае, например, при обрыве кабеля, может привести к выходу оборудования из строя.

### Дистанционное питание удалённого оборудования

Поскольку падение напряжения в линии не влияет на качество передачи информации, то возникает вопрос: а можно ли его дополнительно увеличить, отобрав часть энергии сигнала для питания удалённого оборудования? Оказывается, в некоторых случаях это вполне возможно. Например, если на приёмной стороне добавить в линию дополнительное сопротивление 500 Ом (рис. 4), то при протекании тока на нем будет формироваться падение напряжения от 2 В до 10 В, что вполне достаточно для питания маломощных измерительных узлов. Очевидно, что введение дополнительного падения напряжения в линии должно быть скомпенсировано соответствующим увеличением напряжения источника питания.

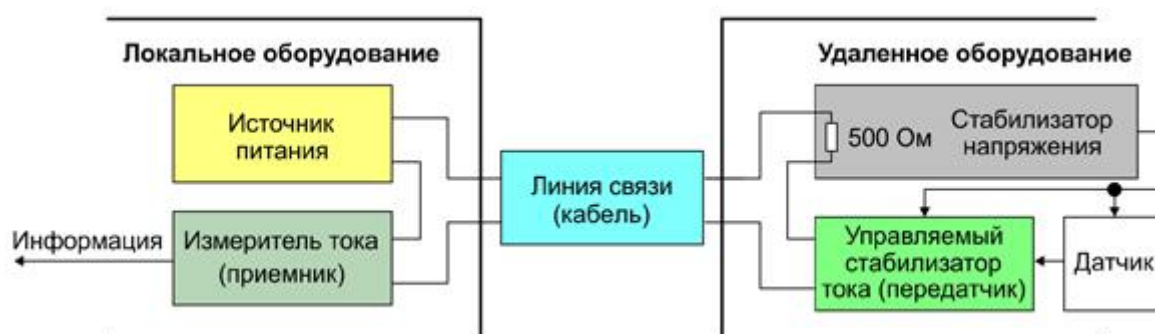


Рис. 4. Дистанционное питание удалённого датчика с помощью токовой петли

В большинстве случаев мощности сигнала, снимаемого с токовой петли интерфейса 4-20 мА, достаточно для питания большинства датчиков. Однако, если разработчику необходимо удалённо питать устройства, содержащие более мощные приборы, например, реле или жидкокристаллический экран с LED-подсветкой, тогда необходимо использовать иные варианты: либо отдельный источник питания, либо другие разновидности интерфейса 4-20 мА.

### Разновидности интерфейсов 4-20 мА

Все рассмотренные выше варианты использования интерфейса 4-20 мА относились к его двухпроводной версии, которая является самой простой и бюджетной. Как было сказано выше, единственным недостатком двухпроводного соединения является ограниченная мощность питания удалённого оборудования, связанная с конечным значением как максимального тока в линии (20 мА), так и максимального падения напряжения на приёмной стороне.

Этот недостаток полностью устранён в четырёхпроводной версии рассматриваемого интерфейса, в которой для питания удалённого оборудования используется отдельный узел, подключаемый с помощью отдельного электрического кабеля (рис. 5). При таком подходе информационная часть системы оказывается полностью изолированной от всех остальных цепей (при условии, что передатчик и приёмник интерфейса 4-20 мА тоже содержат соответствующие изолирующие компоненты), что обеспечивает наивысший уровень защиты от электромагнитных помех. Напряжение питания удалённого оборудования в общем случае может быть любым. Чаще всего используются постоянные (24 или 36 В) или переменное (220 В, 50 Гц) напряжения, что позволяет использовать для этой цели стандартные шины и источники питания.

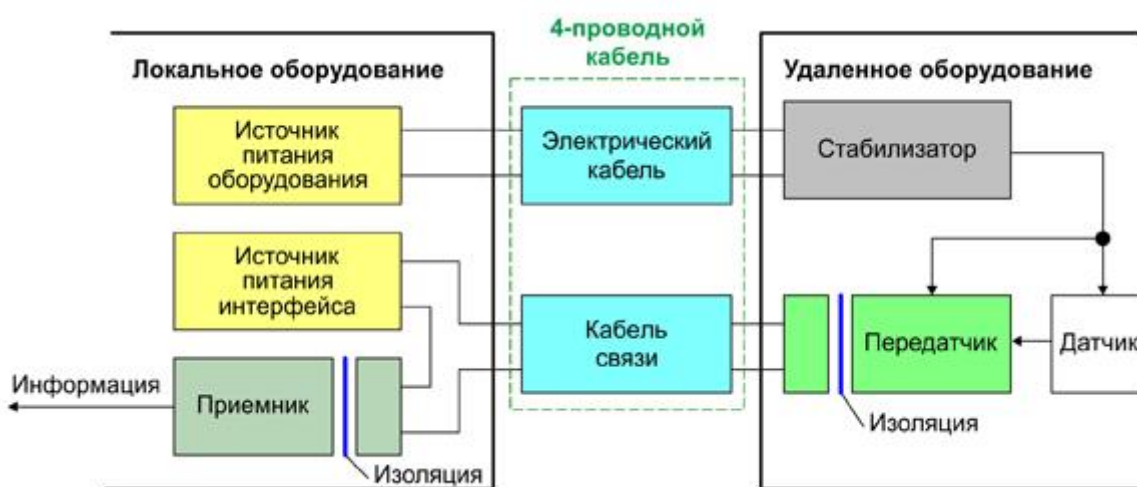


Рис. 5. Четырёхпроводная версия интерфейса 4-20 мА

Очевидно, что такой вариант подключения является самым сложным и дорогим, однако он позволяет дистанционно питать оборудование теоретически любой мощности и передавать информацию с наивысшим уровнем помехозащищённости. Конечно, на практике реальная мощность подключаемого оборудования ограничена пропускной способностью электрического кабеля, да и к интерфейсу 4-20 мА такой способ соединения относится лишь формально, ведь в данном случае речь идёт фактически о двух параллельно работающих независимых системах: системе питания и системе передачи информации.

Незначительно упростить систему можно путём замены двух двухпроводных кабелей одним четырёхпроводным. Однако этот вариант в большинстве случаев будет компромиссным, поскольку жилы проводников электрической части кабеля чаще всего должны иметь большее сечение, а при высоких питающих напряжениях – и большую прочность изоляции, по сравнению с проводами его информационной части. Да и вероятность ошибочного подключения оборудования при использовании четырёхпроводного кабеля значительно возрастает.

Если позволяют технические условия, то можно использовать промежуточный – трёхпроводный вариант интерфейса. Его потенциальные возможности (высокая мощность дистанционного подключаемого оборудования



и уровень помехозащищённости) за счёт отдельных линий питания и передачи информации аналогичны четырёхпроводной версии, но, за счёт исключения электрической изоляции между разными частями системы, эта версия интерфейса оказывается проще и бюджетной. Например, в трёхпроводной версии интерфейса 4-20 мА приёмопередающие узлы и все остальное оборудование можно питать от одного источника (рис. 6).

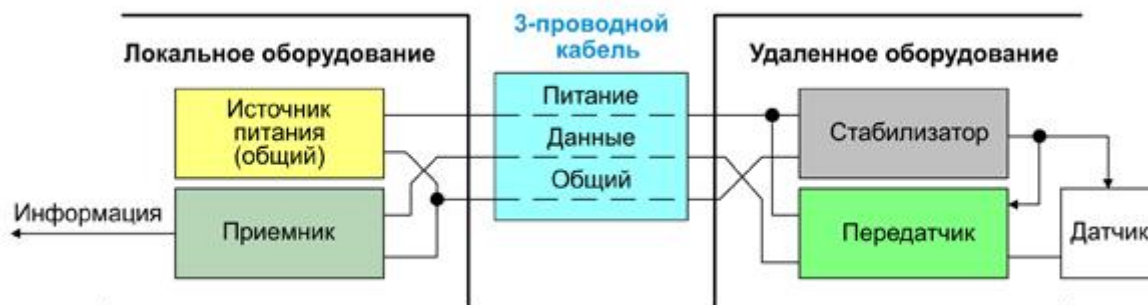


Рис. 6. Трёхпроводная версия интерфейса 4-20 мА

Таким образом, трёх- и четырёхпроводные версии интерфейса 4-20 мА позволяют увеличить мощность дистанционно подключаемого оборудования, однако при этом возрастает как сложность, так и стоимость системы. Кроме этого, при использовании систем на опасных объектах увеличение уровня мощности, подаваемой к удалённому узлу, может вызвать проблемы с обеспечением требуемого уровня искро-, взрыво- и пожарной безопасности. Следует также отметить, что при использовании двухпроводной версии интерфейса 4-20 мА проблем с сертификацией оборудования для работы во взрывоопасных средах практически не возникает, то есть, на удалённое оборудование подаётся настолько мало энергии, что там даже нет условий для возникновения искры.

### Стандарты и примеры применения токовой петли

За все время существования токовой петли было разработано несколько вариантов её практического применения, которые получили достаточно широкое распространение. Изначально (в 50-х годах XX века) токовая петля с уровнями сигналов 0-60 мА использовалась в телеграфии, однако из-за недопустимо высокого (даже в то время) энергопотребления уже с начала 60-х годов максимальный уровень тока был уменьшен до 20 мА. На сегодняшний день 20 мА является предельным значением тока для большинства интерфейсов, хотя, в соответствии с [ГОСТ 26.011-80](#) «Средства измерений и автоматизации. Сигналы тока и напряжения электрические непрерывные входные и выходные», значение этой величины, по согласованию с заказчиком, может достигать 100 мА.

Токовая петля упоминается в ряде отечественных стандартов, например, ИРПС/IFSS (ОСТ 11 305.916-84), ГОСТ 27696-88 или ГОСТ 28854-90 и зарубежных, например, IEC 62056-21/DIN 66258. Однако, ни один из них не является спецификацией непосредственно токовой петли. Например, IEC 62056-21 стандартизирует протокол связи с электросчётчиками, ГОСТ 27696-88 – интерфейсы, применяемые в промышленных роботах, а ИРПС – интерфейс

соединения компьютеров с периферийными устройствами (принтерами, телетайпами и прочим). Таким образом, большинство производителей использует уровни сигналов токовой петли, ставшие традиционными, хотя, уровни сигналов 4-20 мА (впрочем, как и 0-5 мА и 0-20 мА) непосредственно указаны в ГОСТ 26.011.

В целом современные интерфейсы, использующие токовую петлю для передачи данных, отличаются лишь минимальным уровнем допустимого сигнала, который может быть равен либо 0, либо 4 мА. В ряде случаев, для передачи информации может использоваться переменный ток в диапазоне 5...+5 мА (при небольших расстояниях) или -20...+20 мА. Все попытки уменьшить максимальное значение тока для снижения энергопотребления увенчались успехом лишь на коротких линиях, поскольку при малом токе и большой длине кабеля катастрофически падает скорость передачи данных.

Основным применением токовой петли с уровнями сигнала 4-20 мА являются промышленные системы автоматике, для которых необходима высокая надёжность, поэтому в них и используется «смещённый ноль», чтобы своевременно обнаружить неисправность системы управления и принять надлежащие меры для предотвращения возникновения аварийной ситуации.

В последнее время, для систем на основе токовой петли 4-20 мА разработан набор коммуникационных стандартов для промышленных сетей HART (Highway Addressable Remote Transducer). Проводная версия данного протокола фактически является надстройкой над аналоговым интерфейсом 4-20 мА и позволяет использовать одну и ту же линию связи для одновременной передачи и аналогового (при ограничении полосы до 25 Гц) и цифрового сигналов. Передача цифровых данных обеспечивается путём подмешивания в аналоговый сигнал высокочастотных несущих с амплитудой  $\pm 0,5$  мА, модулированных по частоте (1200/2200 Гц) или фазе (3200 Гц). При использовании частотной модуляции пропускная способность цифрового канала равна 1200 бит/с, а фазовая модуляция, за счёт использования 8-позиционной манипуляции, позволяет увеличить этот параметр до 9600 бит/с.