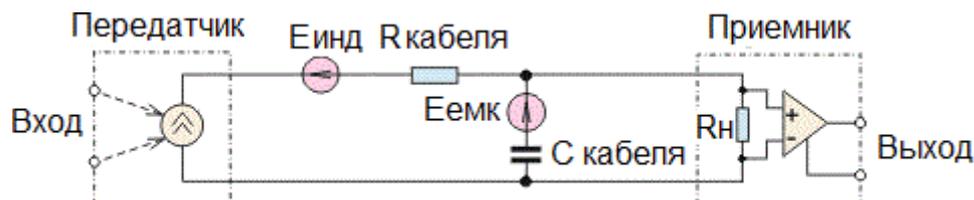


## Исследование генератора постоянного тока (интерфейс 4...20ма)

«Токовая петля» начала применяться в качестве интерфейса передачи данных еще в 50-е годы. Сначала рабочий ток интерфейса составлял 60 мА, а позже, начиная с 1962 года, широкое распространение в телетайпе получил 20 миллиамперный интерфейс токовой петли. В 80-е, когда началось обширное внедрение в технологическое оборудование разнообразных датчиков, средств автоматики и исполнительных устройств, интерфейс «токовая петля» сузил диапазон своих рабочих токов, - он стал составлять от 4 до 20 мА.

Дальнейшее распространение «токовой петли» стало замедляться начиная с 1983 года, с появлением интерфейсного стандарта RS-485.

Передатчик «токовой петли» отличается от передатчика интерфейса RS-485 тем, что в нем используется источник тока, а не источник напряжения.



Ток, в отличие от напряжения, двигаясь из источника по цепи не меняет своего текущего значения в зависимости от параметров нагрузки. Вот почему «токовая петля» не чувствительна ни к сопротивлению кабеля, ни к сопротивлению нагрузки, ни даже к ЭДС индуктивной помехи.

Кроме того ток петли не зависит от напряжения питания самого источника тока, а может изменяться лишь вследствие утечек через кабель, которые обычно пренебрежимо малы. Данная особенность токовой петли полностью определяет способы ее применения.

Стоит отметить, что ЭДС емкостной наводки приложена здесь параллельно источнику тока, и для ослабления ее паразитного действия применяют экранирование.

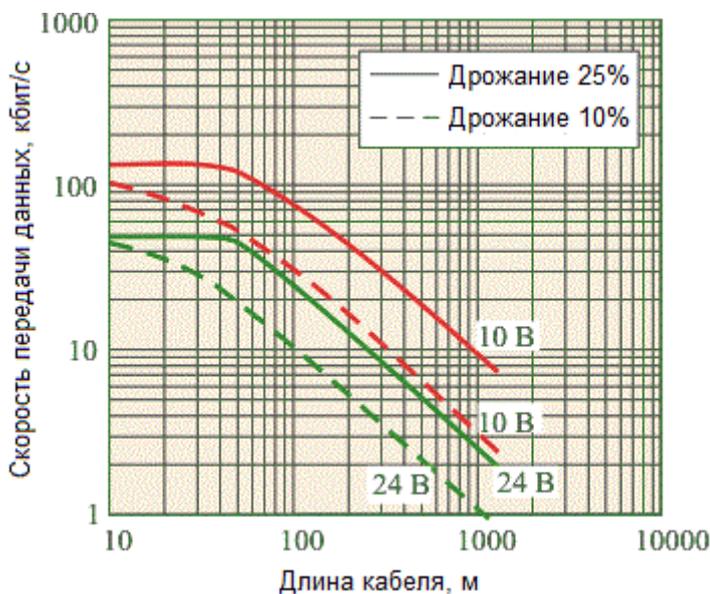
По этой причине линией передачи сигнала обычно выступает экранированная витая пара, которая, работая совместно с дифференциальным приемником, сама ослабляет синфазную и индуктивную помехи.

На стороне приема сигнала, ток токовой петли при помощи калиброванного резистора преобразуется в напряжение. И при токе в 20 мА получается напряжение из стандартного ряда 2,5 В; 5 В; 10 В; - достаточно лишь использовать резистор с сопротивлением соответственно 125, 250 или 500 Ом.

Первый и главный недостаток интерфейса «токовая петля» заключается в его низком быстродействии, ограниченном скоростью зарядки емкости самого передающего кабеля от упомянутого выше источника тока, расположенного на передающей стороне.

Так, при использовании кабеля длиной в 2 км, с погонной емкостью 75 пФ/м, его емкость составит 150 нФ, а это значит что для зарядки данной емкости до 5 вольт при токе 20 мА потребуется 38 мкс, что соответствует скорости передачи данных 4,5 кбит/с.

Ниже приведена графическая зависимость максимально доступной скорости передачи данных по «токовой петле» от длины применяемого кабеля при различных уровнях искажений (дрожания) и при разных напряжениях, оценка проводилась так же как для интерфейса RS-485.



Еще один недостаток «токовой петли» заключается в отсутствии определенного стандарта на конструктивное исполнение разъемов и на электрические параметры кабелей, что тоже ограничивает практическое применение данного интерфейса. Но справедливости ради можно отметить, что фактически общеприняты диапазоны от 0 до 20 мА и от 4 до 20 мА. Диапазон 0 — 60 мА применяется значительно реже.

Наиболее перспективные разработки, требующие применения интерфейса «токовая петля», в большинстве своем используют сегодня только 4...20 мА интерфейс, позволяющий легко диагностировать обрыв линии. Кроме того, «токовая петля» может быть цифровой или аналоговой, в зависимости от требований разработчика (об этом - далее).

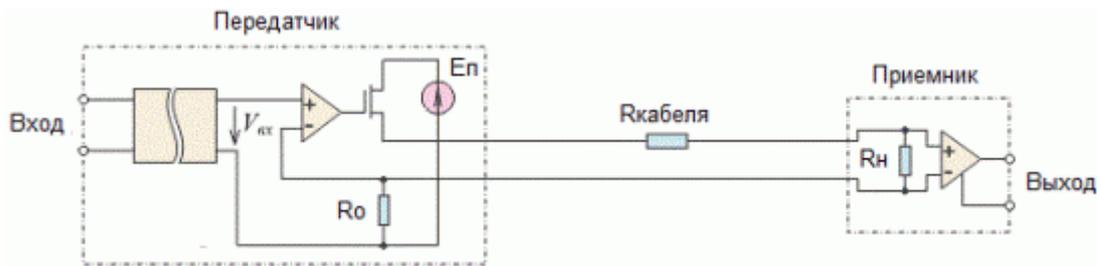
Практически низкая скорость передачи данных по «токовой петле» любого типа (аналоговой или цифровой) позволяет использовать ее одновременно с несколькими приемниками соединенными последовательно, причем согласование длинной линии не потребуется.

### **Аналоговая версия «токовой петли»**

Аналоговая «токовая петля» нашла применение в технике, где необходимо например передавать сигналы от датчиков к контроллерам или между контроллерами и исполнительными устройствами. Здесь токовая петля обеспечивает некоторые преимущества. Прежде всего диапазон варьирования измеряемой величины будучи приведен к стандартному диапазону позволяет изменять компоненты системы. Примечательна и возможность высокоточной (не более +0,05% погрешности) передачи сигнала на значительное расстояние. Наконец, стандарт «токовая петля» поддерживается большинством поставщиков устройств промышленной автоматизации.

Токовая петля 4...20 мА имеет минимальный ток 4 мА в качестве начала отсчета сигнала. Таким образом при обрыве кабеля ток будет равен нулю. Тогда как при использовании токовой петли 0...20 мА диагностировать обрыв кабеля будет сложнее, ибо 0 мА может просто обозначать минимальное значение передаваемого сигнала. Еще одно достоинство диапазона 4...20 мА заключается в том, что уже при уровне 4 мА можно без проблем подводить питание к датчику.

Ниже приведены две схемы аналоговой токовой петли. В первом варианте источник питания встроен в передатчик, тогда как во втором варианте источник питания внешний. Встроенный источник питания удобен в плане монтажа, а внешний позволяет варьировать его параметры в зависимости от назначения и условий работы устройства, с которым применяется токовая петля.



Принцип действия токовой петли одинаков для обеих схем. Операционный усилитель имеет в идеале бесконечно большое внутреннее сопротивление и нулевой ток входов, и значит напряжение между его входами также изначально равно нулю. Таким образом, ток через резистор в передатчике будет зависеть только от величины входного напряжения и будет равен току во всей петле, при этом он не будет зависеть от сопротивления нагрузки. Напряжение на входе приемника может быть поэтому легко определено.

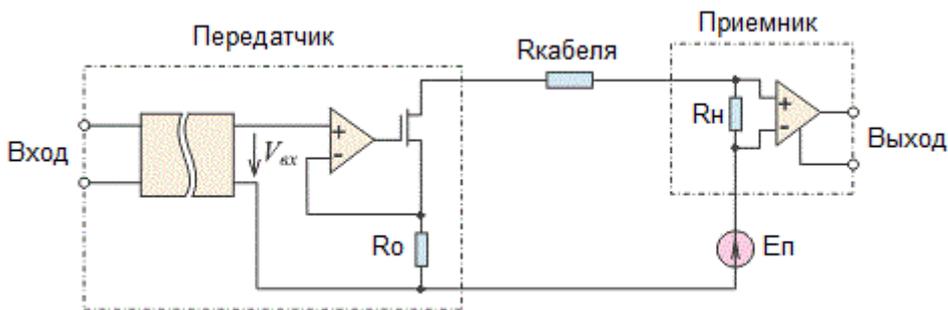


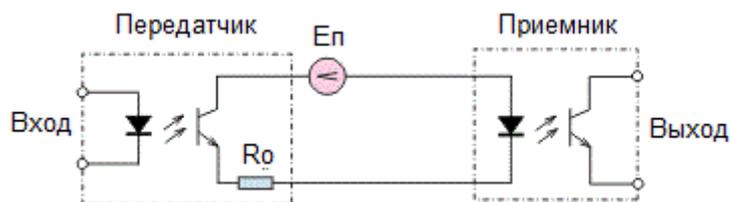
Схема с операционным усилителем отличается тем преимуществом, что позволяет калибровать передатчик без необходимости подключать к нему кабель с приемником, ибо погрешность, вносимая приемником и кабелем, очень незначительна. Напряжение источника выбирается исходя из потребности транзистора передатчика для его нормальной работы в активном режиме, а также с условием компенсации падения напряжения на проводах, на самом транзисторе, и на резисторах. Допустим, резисторы имеют сопротивления по 500 Ом, а кабель — 100 Ом. Тогда для получения тока в 20 мА потребуется напряжение источника 22 В. Выбирают ближайшее стандартное — 24 В. Избыток мощности от запаса по напряжению будет как раз рассеян на транзисторе. Обратите внимание, что на обеих схемах изображена [гальваническая развязка](#) между передающим каскадом и входом передатчика. Это нужно для того чтобы избежать любых паразитных связей между передатчиком и приемником.



В качестве примера передатчика для построения аналоговой токовой петли можно привести готовое изделие NL-4АО с четырьмя аналоговыми каналами вывода для связи компьютера с исполнительным устройством посредством протокола «токовая петля» 4...20 мА или 0...20 мА. Связь модуля с компьютером осуществляется по протоколу RS-485. Устройство калибруется по току для компенсации погрешностей преобразования и исполняет подаваемые с компьютера команды. Калибровочные коэффициенты хранятся в памяти устройства. Цифровые данные преобразуются в аналоговые при помощи ЦАП.

### Цифровая версия «токовой петли»

Цифровая токовая петля работает, как правило, в режиме 0...20 мА, поскольку цифровой сигнал проще воспроизвести именно в таком виде. Точность логических уровней здесь не так важна, поэтому источник тока петли может обладать не очень большим внутренним сопротивлением и сравнительно низкой точностью.



На приведенной схеме при напряжении питания 24 В на входе приемника падает 0,8 В, значит при сопротивлении резистора 1,2 кОм ток будет равен 20 мА. Падением напряжения на кабеле, даже при его сопротивлении в 10% от общего сопротивления петли, можно пренебречь, как и падением напряжения на оптроне. Практически в данных условиях можно считать передатчик источником тока.

## Каким образом аналоговая токовая петля адаптируется к цифровому миру?

Как было сказано выше, токовая петля позволяет передавать цифровые данные. Результаты измерений от датчика можно посылать не в виде аналогового непрерывного сигнала, а в виде дискретных токовых сигналов. Типовая разрядность данных при этом составляет от 12 до 16 бит. Иногда используют разрядность 18 бит, но это скорее является исключением, так как для обычных промышленных систем вполне хватает и 16 бит. Таким образом, токовая петля может быть интегрирована в цифровые системы управления.

## Что еще требуется для передачи цифровых данных?

Для выполнения обмена цифровыми данными будет недостаточно простой пересылки битов в виде токовых импульсов. Необходимо каким-то образом сообщать пользователю, когда начинается и заканчивается пакет данных. Кроме того, требуется контролировать появление ошибок и выполнять некоторые другие функции. Таким образом, для передачи цифровых данных с помощью токовой петли требуется определить формат кадров и реализовать соответствующий протокол передачи.

## Что такое стандарт HART?

HART – общепринятый стандарт, который оговаривает не только физическое кодирование битов, но определяет формат и протокол передачи данных. Например, в формате кадра используются различные поля: многобайтовая преамбула, стартовый байт, многобайтовый адрес, поле команды, поле данных, поле, указывающее количество байтов данных, фактические данные и, наконец, контрольная сумма.

Разработка HART была инициирована Rosemount Corp в 1980-х годах, и вскоре он стал отраслевым стандартом де-факто. Обозначение HART (Highway Addressable Remote Transducer) было закреплено в 1990-х годах, когда стандарт стал открытым и даже был реализован в виде стандарта МЭК для использования в Европе. HART претерпел три основных модификации, но сохранил обратную совместимость со всеми предыдущими версиями, что является крайне важным для рынка промышленной электроники.

Дополнительной особенностью HART является включение информации о производителе электронного устройства в поле команды. Эта информация позволяет избежать путаницы при выполнении установки, отладки и документирования, так как существует более 100 поставщиков HART-совместимых устройств.

## Какие еще улучшения дает HART?

Использование байтового поля адреса позволяет одной токовой петле работать с множеством подключенных датчиков, поскольку каждому датчику может быть присвоен уникальный номер. Это приводит к значительной экономии средств, затрачиваемых на прокладку проводов и монтаж по сравнению с соединением точка-точка.

Подключение множества устройств к одной общей токовой петле означает, что эффективная скорость передачи данных для каждого отдельного устройства уменьшается. Однако чаще всего это не является проблемой. Дело в том, что в большинстве промышленных приложений обновление данных и передача команд происходит довольно редко – порядка одного раза в секунду. Например, температура – наиболее часто измеряемая физическая величина – как правило, меняется достаточно медленно.

Таким образом, стандарт HART делает токовую петлю 20 мА востребованной даже в век цифровых технологий.

## Есть ли какие-либо другие улучшения, которые повышают актуальность данного интерфейса?

Да, другое важное усовершенствование касается питания. Напомним, что токовая петля использует диапазон сигналов 4-20 мА. Источник тока может находиться в передатчике или приемнике. В то же время и датчику, и актуатору требуется дополнительный источник для питания собственной электроники (АЦП, усилители, драйверы и т.д.). Это приводит к усложнению монтажа и увеличению стоимости.

Однако по мере развития интегральных технологий потребление приемников и передатчиков уменьшалось. В результате появилась реальная возможность питания устройств непосредственно от токовой петли. Если потребление электронных компонентов, входящих в состав датчика или актуатора, не превышает 4 мА, то нет необходимости в дополнительном источнике питания. Пока напряжение сигнального контура достаточно велико, интерфейс токовой петли может питать сам себя.

## Есть ли какие-либо другие преимущества у устройств с питанием от токовой петли?

Да. Многие устройства с питанием от сигнальных линий должны иметь разрешение на использование во взрывоопасных зонах. Например, они должны быть сертифицированы, как невоспламеняющиеся (N.I.) или искробезопасные (I.S.). Для устройств любого из этих классов требуется, чтобы энергии, потребляемой электроникой, было так мало, чтобы ее не хватало для возгорания как при нормальных условиях эксплуатации, так и при авариях. Потребляемая мощность устройств с питанием от токовой петли столь мала, что они обычно без проблем проходят данную сертификацию.