

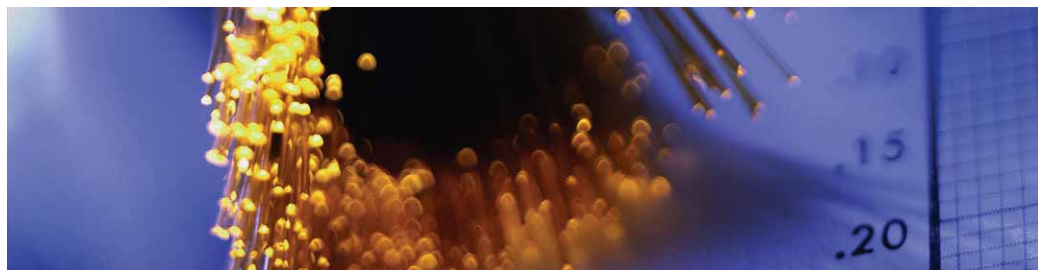
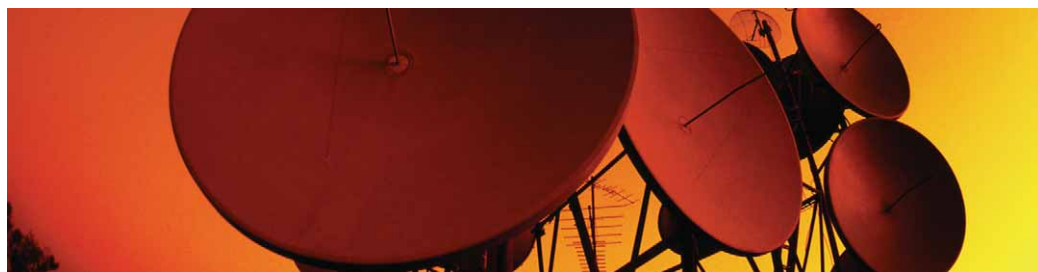
# КОНТРОЛЬ И АВТОМАТИКА

МЕТОДИЧКА

для тех, кто занимается автоматизацией технологических процессов

1

2005



## Входные сигналы

Измерение технологических параметров	2
Термопреобразователи сопротивления	3
Подключение термосопротивлений	4
Погрешности измерения	6
Термоэлектрические преобразователи (термопары)	6
Подключение термоэлектрических преобразователей	7
Нормирующие преобразователи	8
Унифицированные сигналы	9
Нормирующие преобразователи для термодатчиков	13
Масштабирование линейных сигналов	15

## Управление технологическими процессами

Основные термины	16
Описание объектов	17
Переходная характеристика объекта	22
Переходная характеристика датчика	22
Переходная характеристика исполнительного элемента	22
Переходная характеристика системы	23

## Распределенные системы

Интерфейс RS-485: схемы подключения, рекомендации по работе с длинными линиями, рекомендации по прокладке	24
---	----

## Продукция НПФ КонтрАвт

Сигнализация в регуляторах МЕТАКОН	30
------------------------------------	----

## **Уважаемые коллеги!**

Этим выпуском мы начинаем издание ежеквартальной **Методички Контроль и Автоматика**. Эти два слова 11 лет назад дали название российской Научно-производственной фирме КонтрАвт, которая выпускает системы и средства автоматизации технологических процессов. Накопленный за многие годы огромный опыт работы с нашими партнерами убедительно показывает, что их успехи могли быть ещё более впечатляющими, если бы мы предоставляли им не только нашу продукцию, но и знания. Эти знания должны касаться как общих принципов построения измерительных и управляющих систем, так и более частных вопросов применения нашего оборудования для создания подобных систем.

Изложение подобных знаний выходит за рамки обычных Руководств по эксплуатации. Поэтому мы избрали простой и удобный формат «методичек», привычный всем со студенческой скамьи. Что касается способа преподнесения материала, то мы будем стараться придерживаться следующих простых принципов:

- изложение вести на инженерном уровне простоты;
- описывая тему, уделять основное внимание физическому (где уместно – геометрическому) смыслу происходящих явлений;
- обращая внимание на возможные трудности, объяснять первопричины этих трудностей;
- подводить к решению, а не давать готовые;

Итак, предлагаемая методичка призвана:

- сделать наших партнеров «продвинутыми пользователями» как в общетеоретическом, так и практическом плане;
- сделать наших партнеров в буквальном смысле единомышленниками, то есть показать, как мы мыслим, из каких принципов исходим, создавая наши системы и средства автоматизации.

Этим же целям служат популярные разделы нашего сайта «Примеры решений задач по АСУТП» и «Записная книжка инженера» ([www.contravt.ru](http://www.contravt.ru)).

В этом мы видим залог взаимовыгодного и долговременного сотрудничества с Вами

P.S. Конечно же, мы ждем Ваши предложения, замечания, новые темы и вопросы

## Измерение технологических параметров

В различных отраслях промышленности, науки и сельского хозяйства производятся измерения всевозможных физико-химических технологических параметров. Наибольшее число измерений приходится на температуру, давление, уровень, расход, влажность, вес, кислотность. Измерение параметров производится с помощью соответствующих датчиков. Они осуществляют первичное преобразование физико-химической величины, как правило, в какой-либо электрический параметр: напряжение, ток, сопротивление, емкость, индуктивность. Поэтому датчики еще называют первичными преобразователями («первичкой»).

Физико-химический технологический параметр	Первичный преобразователь	Электрический параметр
Температура	Термопреобразователь сопротивления	Сопротивление (медь, платина)
Температура	Термоэлектрический преобразователь	Напряжение (термоЭДС)
Влажность	Ёмкостной датчик ( <i>thermoset polymer</i> )	Ёмкость
Уровень	Ёмкостной датчик	Ёмкость
Вес	Тензодатчик	Сопротивление
Давление	Тензодатчик	Напряжение (пьезоЭДС)

Дальнейшее измерение электрических параметров осуществляется хорошо известными стандартными методами. В ряде случаев электрический параметр измеряется непосредственно вторичными измерительными приборами: измерителями, регистраторами, регуляторами и проч. Чаще всего это относится к датчикам температуры.



НПФ КонтрАвт выпускает вторичные приборы: измерители-регуляторы серий МЕТАКОН и Т-424, нормирующие преобразователи сопротивление-ток и нормирующие преобразователи напряжение-ток.

## Термопреобразователи сопротивления

Измерение температуры с помощью термопреобразователей сопротивления (ТС) основано на температурной зависимости электрического сопротивления металлов, из которого сделан чувствительный элемент ТС. Чувствительный элемент (ЧЭ) обычно изготавливается из меди или платины и конструктивно выполняется в виде проволочной катушки или пленочного покрытия.

Чувствительный элемент характеризуется типом Номинальной Статической Характеристики (НСХ) – зависимости сопротивления от температуры. Эта зависимость нелинейная. Для основных типов НСХ зависимости представлены в виде таблиц в ГОСТ 6651-94. Кратко тип НСХ однозначно определяется двумя параметрами:  $R_0$  – сопротивлением ЧЭ при 0 °С и  $W_{100}$  – отношением сопротивления ЧЭ при 100 °С к его сопротивлению при 0 °С. Основные типы НСХ и соответствующие им параметры  $R_0$  и  $W_{100}$  представлены в таблице. Это наиболее часто применяемые в промышленности типы ЧЭ.

Условное обозначение НСХ	Материал	$R_0$ , Ом	$W_{100}$	Допустимый диапазон температур, °С
100М	Медь	100	1,428	-200...180
50М	Медь	50	1,428	-200...180
100П	Платина	100	1,391	-200...750
50П	Платина	50	1,391	-200...750
Pt100	Платина	100	1,385	-200...750

Современные микропроцессорные приборы, выпускаемые НПФ КонтрАвт, обеспечивают линейризацию НСХ. Перед эксплуатацией при настройке прибора пользователь должен программно установить тип НСХ применяемого датчика.



## Подключение термосопротивлений

Обычно при измерении температуры с помощью термосопротивления на ЧЭ подают стабилизированный ток возбуждения. В результате на датчике возникает разность потенциалов, пропорциональная сопротивлению, а значит, и измеряемой температуре. Таким образом, измерение температуры сводится к измерению напряжения на ЧЭ.

Поскольку ЧЭ имеют малое номинальное сопротивление, сравнимое с сопротивлением подводящих проводов, то должны быть приняты меры по устранению влияния сопротивления подводящих проводов на измерение температуры.

Эффективность мер определяется методом измерения и способом подключения ко вторичному прибору. Основных схем подключения три:

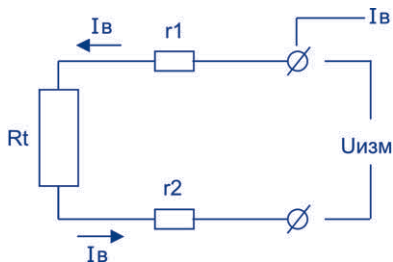
- двухпроводная;
- трехпроводная;
- четырехпроводная.

### Двухпроводная схема подключения термосопротивлений

В простейшей двухпроводной схеме влияние сопротивления подводящих проводов не устраняется. Напряжение измеряется не только на ЧЭ, но и на соединительных проводах.

$$U_t = U_{\text{изм}} - U_{r1} - U_{r2}$$

При этом нужно иметь в виду, что сопротивление соединительных проводов проявляет себя двумя способами. Во-первых, изменяется эквивалентное сопротивление датчика, что приводит к смещению в измерении температуры. Во-вторых, сопротивление соединительных проводов само по себе зависит от температуры окружающей среды.

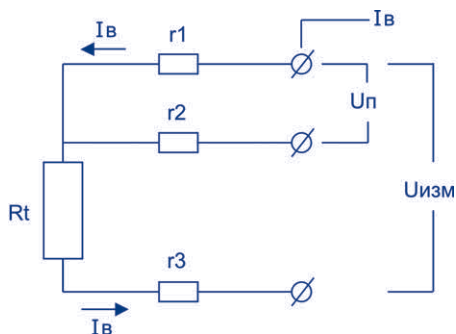


Иногда смещение температуры пытаются скорректировать во вторичном приборе, однако этот подход неэффективен, так как температура окружающей среды меняется.

Двухпроводная схема может быть использована в случае, если сопротивлением подводящих проводов ( $r1, r2$ ) можно пренебречь по сравнению  $Rt$ .

## Трёхпроводная схема подключения термосопротивлений

Влияние сопротивления соединительных проводов в трёхпроводной схеме устраняется путем компенсации. Компенсация возможна, если соединительные провода одинаковы. В этом случае появляется возможность выделить отдельно напряжение на соединительных проводах и скомпенсировать его.

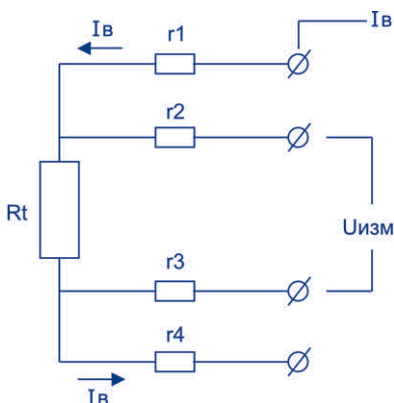


$$U_t = U_{\text{изм}} - U_{r1} - U_{r2} \cong U_{\text{изм}} - 2U_n$$

Равенство сопротивлений соединительных проводов и их температурных зависимостей является основным условием применимости трехпроводной схемы.

## Четырёхпроводная схема подключения термосопротивлений

В четырехпроводной схеме питание ЧЭ током возбуждения производится с помощью одних проводов, а измерение разности потенциалов на ЧЭ – с помощью других. Если измерение напряжения производится высокоомным вольтметром (ток через r2 и r3 не течет), то влияние сопротивления всех проводов полностью исключается.



$$U_t = U_{\text{изм}}$$

Следует учесть, что если измерительный прибор рассчитан на четырехпроводную схему, то датчик к нему можно подключить и по двухпроводной схеме. При этом дополнительная погрешность измерения, вызванная влиянием соединительных проводов, будет иметь величину порядка  $(r_2+r_3)/R_t$ .

## Погрешности измерения

Погрешности измерения, которые возникают за счет влияния соединительных проводов, для различных схем приведены в таблице.

Схема подключения	Дополнительная погрешность	Примечание
Двухпроводная	$(r1+r2)/Rt$	
Трехпроводная	$\Delta r/Rt$	$\Delta r$ – разность сопротивлений соединительных проводов
Четырехпроводная	$(r2+r3)/Rvx$	$Rvx$ – входное сопротивление вольтметра



В измерителях-регуляторах Т-424 и МЕТАКОН, выпускаемых НПФ КонтрАвт, применяется четырехпроводная схема. Без внесения дополнительной погрешности можно применять соединительные провода с сопротивлением до 100 Ом.

Двухпроводная схема подключения также применима, но при условии выполнения соответствующих требований к сопротивлению соединительных проводов (см. таблицу).

## Термоэлектрические преобразователи (термопары)

Принцип измерения температуры с помощью термопары основан на эффекте возникновения термоЭДС  $E(T)$  в месте контакта (спая) разнородных металлов. Контакт (спай) разнородных металлов, помещаемый в измеряемую среду, называется рабочим спаем. В месте подключения термопары к измерительному прибору образуется, так называемый, холодный спай, на котором также возникает термоЭДС. В итоге напряжение  $V_{изм}$ , которое регистрирует измерительный прибор, будет определяться разностью температур рабочего и холодного спаев:

$$V_{изм} = E(T_{гор}) - E(T_{хол})$$

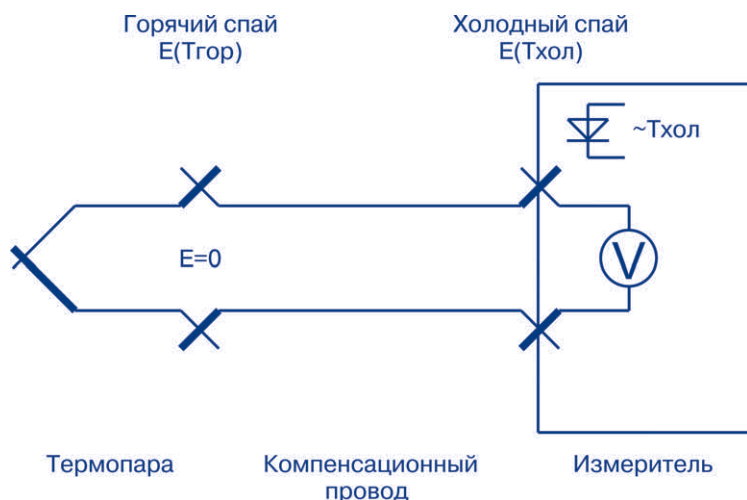
Зависимость термоЭДС  $E(T)$  от температуры (НСХ) нелинейна. НСХ различных термопар приведены в ГОСТ 6616-94.



В приборах НПФ КонтрАвт производится линейаризация нелинейности термопар, а также автоматическая компенсация влияния температуры холодного спая. Для этого с помощью специального полупроводникового датчика измеряется температура в месте подключения термопары к клеммным соединителям прибора.



## Подключение термоэлектрических преобразователей



Подключение к клеммным соединителям должно производиться либо термопарными электродами того же типа, что и используемая термопара, либо соответствующими компенсационными проводами. При работе с приборами НПФ КонтрАвт общее сопротивление соединительных проводов не должно превышать 100 Ом. Компенсационные провода обычно дешевле, имеют необходимую оболочку и меньшее электрическое сопротивление.

Соединение компенсационных проводов как с термопарой, так и с прибором должно производиться с соблюдением полярности. Обычно производители термопар маркируют плюсовой вывод термопары цветным или черным изоляционным материалом. В месте подключения к прибору необходимо исключить локальный нагрев или обдув, а также быстрые изменения температуры.

Перед подключением термопар к клеммным соединителям концы проводов следует зачистить, чтобы удалить окислы, оказывающие влияние на точность измерения.

### Нормирующие преобразователи

Подключение датчиков непосредственно ко вторичному измерительному прибору в случае их большой удаленности сталкивается с определенными трудностями, которые связаны с сильным воздействием электромагнитных помех на слабые измеренные сигналы, а также паразитным влиянием соединительных проводов (емкость, сопротивление).

В настоящее время общая тенденция построения датчиков заключается в том, что в измерительный тракт вслед за датчиком включают электронные устройства – нормирующие преобразователи, которые позволяют:

- реализовать метод измерения электрического параметра;
- усилить слабые сигналы;
- произвести (при необходимости) линеаризацию нелинейных характеристик первичного преобразователя;
- произвести термокомпенсацию, если первичный преобразователь подвержен сильному влиянию температуры, как, например, в случае с термопарами и емкостными датчиками влажности;
- снизить влияние электромагнитных помех.

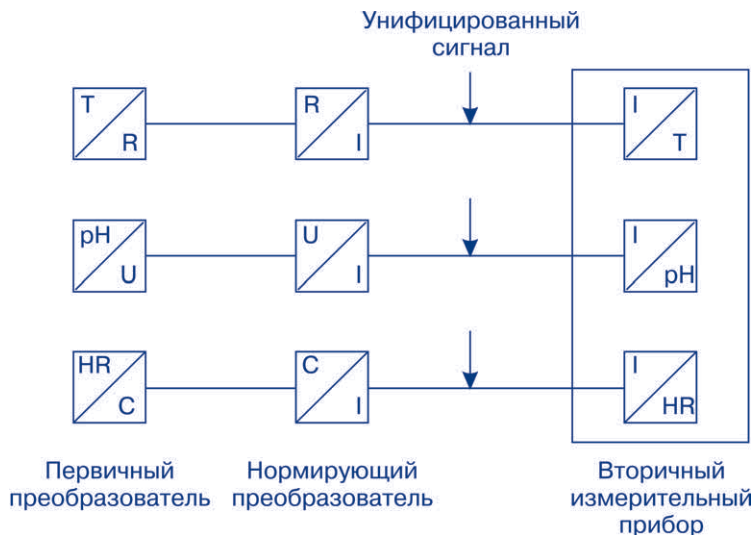
Конструктивно нормирующие преобразователи размещают либо непосредственно в корпусе датчика (см. раздел «Нормирующие преобразователи для термодатчиков»), либо выполняют в виде независимых модулей, которые крепятся на DIN-рельсы или специальные панели рядом с датчиками.

## Унифицированные сигналы

Нормирующие преобразователи решают еще одну очень важную задачу.

Как было сказано выше, в промышленности применяется огромное разнообразие первичных преобразователей физико-химических величин, каждый из которых имеет свой выходной электрический сигнал. Чтобы избежать такого же разнообразия вторичных измерительных и регулирующих приборов, датчики оснащаются нормирующими преобразователями, которые преобразуют различные сигналы первичных преобразователей (термопар, термопреобразователей сопротивления, влажности, давления, веса, рН и проч.) в унифицированные сигналы постоянного тока или напряжения. Происходит нормирование и стандартизация сигналов связи.

На функциональной схеме мы видим, как один многоканальный вторичный измерительный прибор, рассчитанный на один тип унифицированного сигнала, работает с датчиками различных физико-химических параметров.



Если говорить более широко, унифицированные сигналы применяются для связи не только датчиков, но и других устройств промышленной автоматики: регистраторов, регуляторов, контроллеров, исполнительных механизмов и проч. Применение унифицированных сигналов регламентировано ГОСТ 26.011-80. Стандарт устанавливает допустимые диапазоны унифицированных сигналов, а также вводит ограничения на величину сопротивления источников и приемников этих сигналов.

Сигнал напряжения, В	Нагрузочное сопротивление, Ом, не более	Входное сопротивление приемника, Ом, не менее
От 0 до 0, 01 включит.	–	10000
От 0 до 1 включит.	–	10000
От 0 до 10 включит.	2000	–

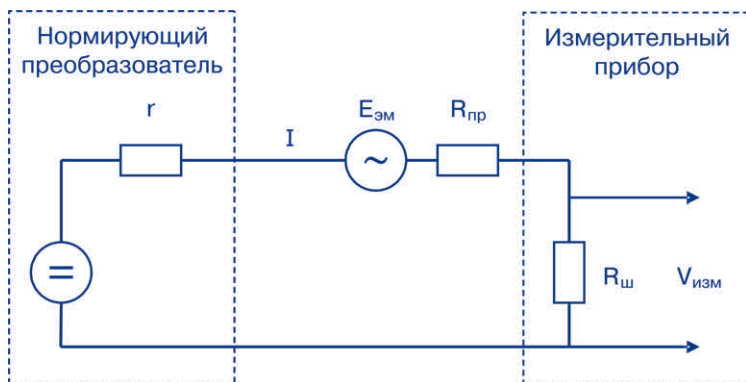
Сигнал тока, мА	Выходное сопротивление источника, Ом, не менее	Входное сопротивление приемника, Ом, не более
От 0 до 5 включит.	2500 (2000)	500
От 0 до 20 включит.	1000 (500)	250
От 4 до 20 включит.	1000 (500)	250

Среди стандартных сигналов тока и напряжения наиболее удобным и популярным является токовый сигнал 4-20 мА. Причины этого в том, что он наилучшим образом решает названные выше проблемы, связанные с передачей сигналов от удаленных датчиков к вторичным измерительным приборам.

Сигналы первичных преобразователей, как правило, очень малы. Например, сигналы термодпар обычно меньше 50 мВ. В промышленных условиях сильные электромагнитные помехи могут создавать паразитные сигналы, в сотни и тысячи раз превышающие полезные. Сильные токовые сигналы уровня 4-20 мА работают на низкоомную нагрузку, в результате они меньше подвержены такому влиянию.

Для передачи токовых сигналов можно использовать соединительные провода, более дешевые по сравнению, например, с компенсационными. При этом требования к величине их сопротивления также могут быть снижены.

Поясним сказанное. Нормирующий преобразователь, который формирует токовый сигнал 4-20 мА, является так называемым генератором тока – источником стабильного тока с очень большим выходным сопротивлением:  $r \gg R_{ш}, R_{пр}$ , где  $r$  – дифференциальное выходное сопротивление нормирующего преобразователя,  $R_{ш}, R_{пр}$  – соответственно сопротивления шунта в измерительном приборе и соединительных проводов.



Поскольку величина тока  $I$  не зависит от сопротивления нагрузки, а  $V_{изм} = I \cdot R_{ш}$ , то сопротивление проводов не влияет на результат измерения. Для оценки можно принять, что дополнительная относительная погрешность, связанная с влиянием сопротивления нагрузки ( $R_{пр} + R_{ш}$ ), равна

$$\delta = (R_{пр} + R_{ш}) / (r + R_{пр} + R_{ш}) \cong (R_{пр} + R_{ш}) / r.$$

Для характерных значений  $r = 1 \text{ МОм}$ ,  $R_{пр} = 500 \text{ Ом}$ ,  $R_{ш} = 50 \text{ Ом}$ , имеем  $\delta < 0,06\%$ .

С другой стороны, в такой высокоомной цепи источник электромагнитных помех  $E_{эм}$  не в состоянии создать сколько-нибудь заметное по сравнению с полезным сигналом  $V_{изм}$  напряжение на низкоомном шунте  $R_{ш}$ . Напряжение помехи, измеренное прибором, будет равно:

$$V_n = E_{эм} \cdot (R_{ш} / r).$$

При  $E_{эм} = 1 \text{ В}$ , напряжение помехи будет составлять  $V_n = 50 \text{ мкВ}$ . Полезный сигнал при  $I = 20 \text{ мА}$  имеет величину  $1 \text{ В}$ . Таким образом, отношение помехи к полезному сигналу имеет порядок  $10^{-4}$ , а величина  $(r/R_{ш})$  показывает степень подавления электромагнитных помех.

Нетрудно показать, что при работе с сигналами напряжения сигнал помехи  $V_n$  практически равен  $E_{эм}$ . Это демонстрирует преимущество токовых сигналов при работе в условиях сильных электромагнитных помех по сравнению с сигналами напряжения.

В заключение отметим, при работе с токовым сигналом 4-20 мА легко обнаружить обрыв линии связи – ток будет равен нулю, т.е. выходить за возможные пределы. Обрыв в цепи с сигналом 0-5 мА обнаружить нельзя, так как ток, равный нулю, считается допустимым. Для обнаружения обрыва в цепях с унифицированными сигналами напряжения (0-1В или 0-10В) придется применять специальные схемотехнические решения, например, «подтяжку» более высоким напряжением через высокоомный резистор.

## Нормирующие преобразователи для термодатчиков

Несмотря на то, что первичные термопреобразователи часто подключают непосредственно к вторичным приборам, в ряде случаев оказывается целесообразным применение нормирующих преобразователей. Очень удобным является конструктивное исполнение, позволяющее размещать нормирующий преобразователь в головке термопреобразователя.

В таком конструктивном исполнении НПФ КонтраАвт выпускает два типа нормирующих преобразователей:

- преобразователи сопротивление-ток ПСТ, предназначенные для работы с термопреобразователями сопротивления ТСМ и ТСП;
- преобразователи напряжение-ток ПНТ, предназначенные для работы с термопарами типа ХА(К), ХК (L), НН (N).

Оба типа преобразователей

- реализуют метод измерения электрического параметра и усиление слабого сигнала;
- осуществляют линеаризацию нелинейных характеристик термодатчика;
- нормируют сигнал и приводят его к унифицированному виду;
- дополнительно преобразователь ПНТ обеспечивает термокомпенсацию влияния «холодного» спая термопары.

Применение нормирующих преобразователей позволяет:

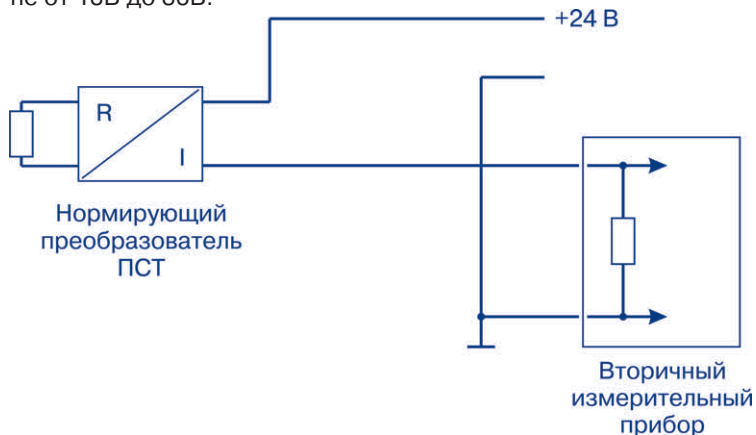
- снизить влияние электромагнитных помех;
- снизить требования к соединительным проводам и сократить расходы на них;
- унифицировать сигналы, используемые в системе, а значит, упростить номенклатуру применяемых вторичных приборов.



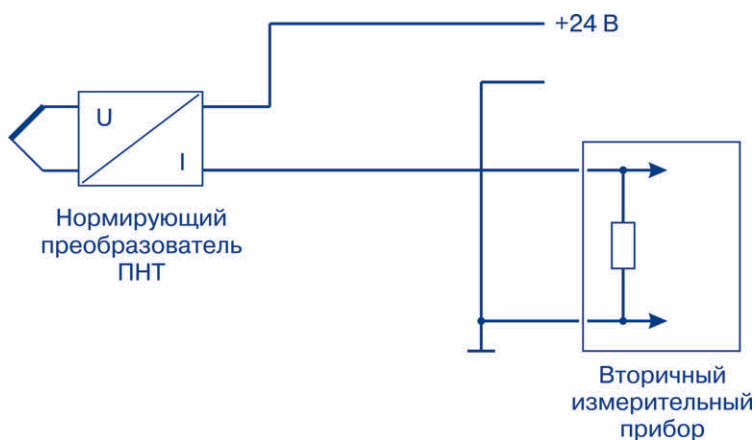
## ВХОДНЫЕ СИГНАЛЫ

Подключение нормирующих преобразователей ко вторичному измерительному прибору производится по двухпроводной схеме.

При этом сопротивление соединительных проводов не оказывает влияния на результат измерения. При напряжении питания 24 В допускается использовать соединительные провода с сопротивлением от 0 до 300 Ом без увеличения погрешности измерения. Напряжение питания может изменяться в диапазоне от 18В до 36В.



Подключение термосопротивлений к нормирующему преобразователю.



Подключение термопар к нормирующему преобразователю



## Масштабирование линейных сигналов



Приборы серии **МЕТАКОН** позволяют отображать измеренные сигналы нормирующих преобразователей и термопреобразователей непосредственно в единицах физических величин.

Рассмотрим как это работает на примере универсального быстродействующего регулятора **МЕТАКОН-515**.

**Пример.** Предположим, нормирующий преобразователь обеспечивает преобразование уровня в диапазоне от 1 до 5 м в токовый сигнал 4...20 мА. Преобразователь необходимо подключить к универсальному входу. А регулятор установить в режим приема сигнала 4...20 мА. Необходимо организовать индикацию измеренного сигнала следующими тремя разными способами:

**Задача 1.** Необходимо отображать значение измеренного токового сигнала в единицах длины ( в см);

**Решение.** На этапе **КОНФИГУРИРОВАНИЕ** необходимо установить:

- положение десятичной точки на индикаторе (в терминах прибора МЕТАКОН 515 – установить параметр «**.А.**» в значение **000.0** для индикации длины в сантиметрах и десятичных долях;
- установить масштабный коэффициент «начальная точка линейной шкалы» («**А.В.**») в значение **100.0**;
- установить масштабный коэффициент «начальная точка линейной шкалы» («**А.Е.**») в значение **500.0**

**Задача 2.** Необходимо отображать значение измеренного сигнала в процентах от полного диапазона;

**Решение.** Аналогично Задаче 1, только параметры («**А.В.**») и («**А.Е.**») устанавливаются в значения **000.0** и **100.0** соответственно.

**Задача 3.** необходимо отображать значение измеренного сигнала в мА (4...20мА).

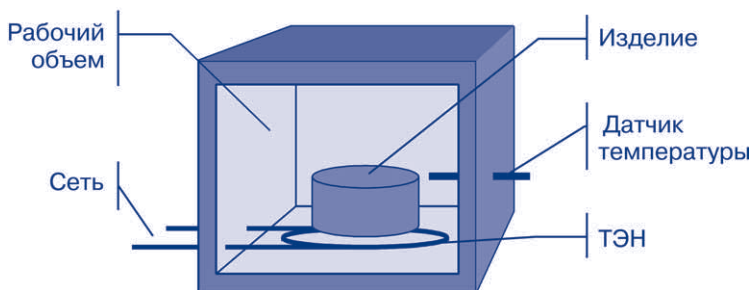
**Решение.**

- Параметр «**.А.**» имеет значение **00.00**
- «**А.В.**» - **04.00**
- «**А.Е.**» - **20.00**

## Основные термины

На простейшем примере укажем, не давая строгих определений, основные термины, которые используются в автоматическом управлении технологическими процессами.

**Пример.** На машиностроительном предприятии стоит задача термической обработки изделий из металла: изделие необходимо выдержать в течение некоторого времени при определенной температуре. Для этого изделие помещают в печь с электрическим нагревом. Нагрев осуществляют ТЭНом .

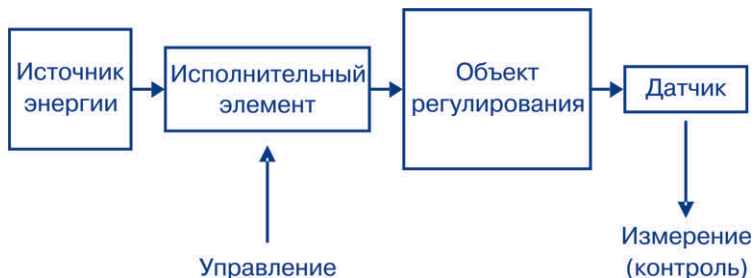


Итак, мы говорим о **технологическом процессе**, который заключается в том, что изделие нагревается до определенной температуры и выдерживается при ней в течение некоторого времени. Так достигается необходимый технологический результат: изделие под воздействием температуры меняет свои физико-химические свойства. Температура является тем ключевым физическим фактором, который определяет технологические условия и обеспечивает технологический результат. Ее называют **технологическим параметром**.

Технологический параметр должен поддерживаться на определенном уровне как в рабочем объеме печи, так и в самом изделии. В автоматическом управлении рабочий объем печи и изделие в нем являются **объектом регулирования**. Если изделие вынимают из печи, то объектом регулирования остается только рабочий объем. Ясно, что при этом изменяются свойства объекта регулирования. Для того, чтобы контролировать технологический параметр (температуру) в объекте (в рабочем объеме) в него помещают **датчик** температуры (например, термопару), который преобразует технологический пара-

метр в электрический сигнал, измеряемый вторичным измерительным прибором. ТЭН осуществляет нагрев объекта за счет преобразования электрической энергии источника в тепловую. Он является **исполнительным элементом**.

Таким образом, для успешного протекания **технологического процесса** мы должны с помощью **исполнительного элемента** обеспечить в **объекте регулирования** поддержание на заданном технологией уровне значения **технологического параметра**, которое контролируется **датчиком**. Теперь можно перейти к рассмотрению следующей типовой блок-схемы, которая применима для описания большого числа разнообразных задач.



## Описание объектов

Прежде, чем формулировать задачу автоматического управления технологическим процессом, рассмотрим некоторые способы описания входящих в данную блок-схему элементов: **исполнительный элемент**, **объект**, **датчик**.

### Объект

Построим простейшую математическую модель объекта регулирования – печи. Для этого составим уравнение теплового баланса:

$$Q_{\text{нагр}} = Q_{\text{охл}} + Q_{\text{ист}}$$

где

$Q_{\text{нагр}} = C M [T(t) - T(t - \Delta t)]$  – количество тепла, которое требуется для того, чтобы нагреть на температуру  $T(t) - T(t - \Delta t)$  объект с массой  $M$  и удельной теплоемкостью  $C$  за время  $\Delta t$ ;

$Q_{\text{охл}} = -\lambda_{\text{oc}} [T(t) - T_{\text{cp}}(t)] \Delta t$  – тепловые потери за время  $\Delta t$  за счет теплопередачи в окружающую среду с температурой  $T_{\text{cp}}(t)$  и с коэффициентом теплопередачи «объект-среда»  $\lambda_{\text{oc}}$ .

$Q_{\text{ист}} = \lambda_{\text{он}} [T_{\text{н}}(t) - T(t)] \Delta t$  – количество тепла, которое поступает за время  $\Delta t$  от нагревателя с температурой поверхности  $T_{\text{н}}(t)$  и с коэффициентом теплопередачи «объект-нагреватель»  $\lambda_{\text{он}}$ .

В результате температура в объекте описывается следующим уравнением:

$$\frac{dT}{dt} + \frac{T}{\tau_0} = \frac{1}{\tau_0} \left[ \frac{T_{\text{cp}}(t)}{1+\mu} + \frac{T_{\text{н}}(t)\mu}{1+\mu} \right]$$

где

$\tau_0 = C M / (\lambda_{\text{oc}} + \lambda_{\text{он}})$  – постоянная времени объекта с учетом эффектов теплопередачи с окружающей средой и нагревателем;

$\mu = \lambda_{\text{он}} / \lambda_{\text{oc}}$  – коэффициент, показывающий насколько эффективней теплопередача «объект-нагреватель» по сравнению с теплопередачей «объект-среда».

Полученная простейшая модель позволяет подтвердить интуитивно понятные представления о поведении печи. Предположим, что печь (а также и нагреватель) находились при постоянной температуре окружающей среды  $T_{\text{cp}}^0$ , а в начальный момент времени  $t=0$  нагреватель скачкообразно приобрел температуру  $T_{\text{н}}$ . График изменения температуры в печи будет иметь вид:

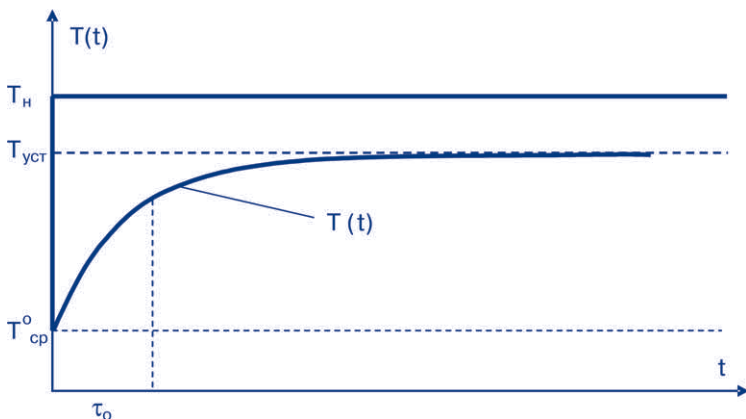


График построен при условии, что температуры окружающей среды и нагревателя фиксированы.

1. Из уравнения и графика видно, что, несмотря на скачкообразное изменение температуры нагревателя, температура объекта нарастает плавно. Характерное время нарастания равно постоянной времени  $\tau_0$ . Очень важно то, что это время не зависит от температуры ни нагревателя, ни окружающей среды. Постоянная времени  $\tau_0$  (ее еще называют временем тепловой инерции объекта) определяется только свойствами объекта (теплоемкостью  $C$  и  $M$ ) и условиями теплообмена с окружающей средой и нагревателем  $\lambda_{oc}$  и  $\lambda_{он}$ . Физически понятно, что печь с большой массой и теплоемкостью будет инерционной, и наоборот, при сильной теплопередаче ( $\lambda_{oc}$  и  $\lambda_{он}$  - велики) инерционность печи уменьшается. Если исходить из того, что задача печи состоит в том, чтобы стабилизировать технологические условия (стабилизировать температуру), ее теплоемкость должна быть значительно выше теплоемкости изделий, которые обрабатываются в печи, и кроме того, необходимо обеспечивать максимальную термоизоляцию печи (снижать  $\lambda_{oc}$ ). Однако рекомендации могут оказаться несколько иными, если печь предназначена для создания технологических условий, достаточно быстро меняющихся во времени по необходимому закону (термоциклирование).

2. Обратим внимание на температуру  $T_{уст}$ , которая установится в печи спустя время  $t \gg \tau_0$ . Температура не меняется (а значит  $dT/dt = 0$ ) и из уравнения следует условие теплового баланса:

$$T_{уст} = \frac{T_{ср}^0}{1+\mu} + \frac{T_{н}\mu}{1+\mu}$$

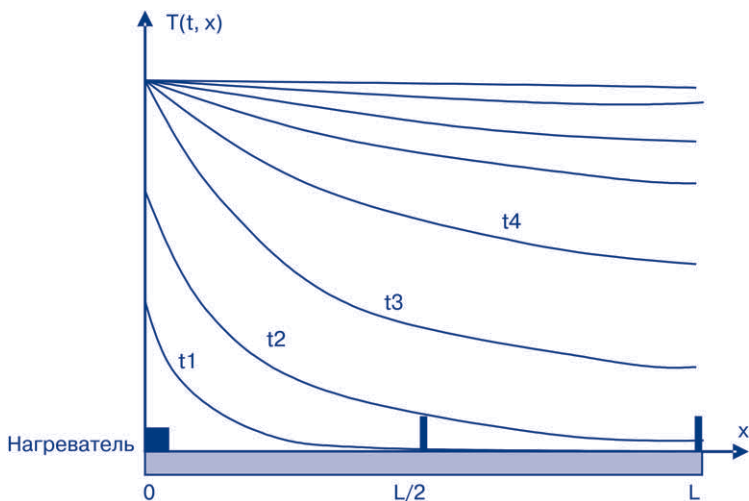
Видно, что на установившуюся температуру в печи влияет температура как окружающей среды  $T_{ср}^0$ , так и нагревателя  $T_{н}$  – их изменение приводит к изменению температуры объекта. Однако, если говорить о задаче стабилизации температуры в печи, то роль окружающей среды и роль нагревателя, можно сказать, противоположны. Если температура окружающей среды неподконтрольно изменчива и с точки зрения задачи печи является возмущающим (дестабилизирующим) фактором, то нагревателем мы можем управлять и тем самым компенсировать возмущающие воздействия окружающей среды. Забегая вперед, уверенно можно утверждать, что одна из задач управления технологическим процессом как раз и состоит в том, чтобы управлять нагревателем так, чтобы компенсировать возмущающие

воздействия. При этом окружающая среда - далеко не единственный возмущающий фактор.

Из сказанного и из уравнения теплового баланса следует, что для уменьшения влияния среды нужно уменьшать теплообмен с окружающей средой (увеличивать  $\mu = \lambda_{\text{он}} / \lambda_{\text{ос}}$ ), одновременно возрастает эффективность нагревателя.

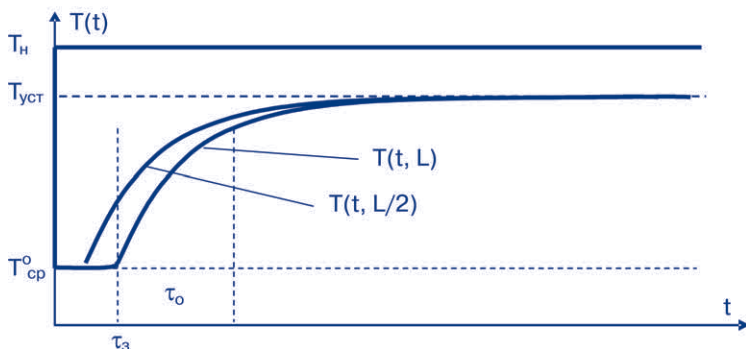
Обсудим теперь некоторые важные обстоятельства, которые не учитываются нашей упрощенной моделью, но которые являются принципиально важными, когда речь идет об автоматическом регулировании.

**Реальные объекты являются не сосредоточенными (точечными) как в нашей модели, а пространственно распределенными.** Нашу упрощенную модель можно применять и для распределенного объекта, но теперь под температурой следует понимать усредненную по пространству рабочую область. В реальных объектах нагреватели и датчики имеют, как правило, малые размеры по сравнению с рабочими объемами и могут быть удалены друг от друга. В результате температурное поле в рабочем объеме может быть сильно неоднородным, а значит, результаты измерения в разных точках будут существенно различаться. На рисунке показано пространственное распределение температуры в печи по координате  $x$  в разные моменты времени  $t_1 < t_2 < t_3 < \dots$ . Температурное поле создавалось нагревателем расположенном в точке  $x=0$ .



На противоположном конце печи в точке  $x=L$  температура начала меняться только в момент времени  $t_2$ , а до этого ничто не указывало на работу нагревателя. Таким образом, в системе «нагреватель – объект – точка измерения» наблюдается так называемое транспортное запаздывание. Величина транспортного запаздывания определяется как взаимным расположением нагревателя и точки измерения, так и свойствами объекта.

Для точки измерения в  $x=L$  транспортное запаздывание равно  $\tau_3 = t_2$ . Графики зависимости температуры от времени для двух различных точек измерения  $x=L/2$  и  $x=L$  имеют вид:



Транспортное запаздывание является важнейшим фактором, определяющим возможности и качество управления. Связано это с тем, что в течение этого времени ничего неизвестно о реакции системы на регулирующие воздействия нагревателя. Представьте себе ситуацию, когда водитель повернул руль, а автомобиль начинает поворот только через 3-5 секунд.

Транспортное запаздывание уменьшают путем сближения нагревателя и точки измерения, а также конструктивным путем, например, интенсивным перемешиванием, применением распределенных нагревателей, менее вязких теплоносителей, хороших теплопроводников и т.п. Как правило, одновременно решается и проблема неравномерности температурного поля в объекте.

Второе обстоятельство, которое необходимо учитывать в автоматическом управлении, заключается в том, что в реальных задачах теплотехнические свойства объекта не остаются постоянными, а могут изменяться в ходе процесса. Например, печь с загрузкой и без нее – это два разных объекта.

В некоторых случаях при изменении температуры меняется фазовое состояние объекта: происходит плавление, начинается кипение. Это также приводит к изменению теплотехнических свойств объекта.

### Переходная характеристика объекта

*Зависимость температуры в точке измерения при скачкообразном изменении температуры нагревателя называется переходной характеристикой объекта.* Переходная характеристика однозначно описывает объект.

Для справки укажем, что спектр переходной характеристики является частотной характеристикой (передаточной функцией) объекта. Кроме того, переходная характеристика позволяет рассчитать поведение температуры в объекте при любой временной зависимости температуры нагревателя (а не только скачкообразной) с помощью так называемого интеграла Дюамеля.

### Переходная характеристика датчика

Переходная характеристика датчика практически может быть получена путем скачкообразного изменения температуры среды, в которой находится датчик (например, путем перемещения между сосудами с жидкостью с разными температурами). Общий вид переходной характеристики датчика будет таким же. Транспортное запаздывание датчика обусловлено толщиной оболочки датчика и защитного чехла. Время инерции определяется теплоемкостью датчика и условиями теплообмена. Следует иметь в виду, что теплопередача поверхности датчика в жидкости выше, чем в воздухе, поэтому время инерции в жидкости меньше, чем в воздухе.

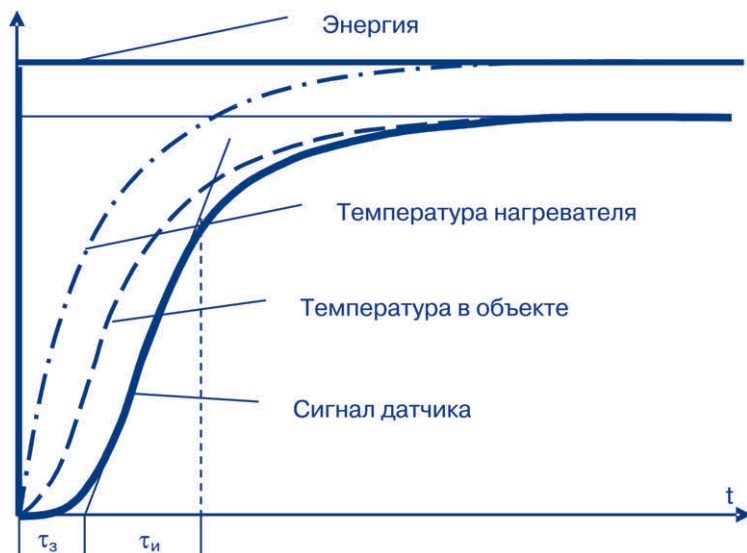
### Переходная характеристика исполнительного элемента

Все сказанное выше полностью применимо и к исполнительным устройствам. Единственный комментарий связан с тем, что существуют исполнительные элементы с очень большим транспортным запаздыванием. В отопительных системах после поворота заслонки обычно может проходить большое время (от единиц до десятков минут), прежде чем теплоноситель дойдет до нагревателя (радиатора).



## Переходная характеристика системы

В заключение рассмотрим переходную характеристику системы, состоящей из исполнительного устройства, объекта, датчика. Переходная характеристика в этом случае представляет собой изменение во времени электрического сигнала на выходе датчика при скачкообразном поступлении энергии на исполнительное устройство.



На графике, кроме сигнала на выходе датчика, показаны еще зависимости температуры поверхности нагревателя и истинной температуры в объекте. Вследствие тепловой инерции всех элементов системы – нагревателя, объекта, датчика – все временные изменения происходят с запаздыванием. Очевидно, что сигнал датчика является всего лишь «измеренной температурой», и конечно же, отличается от истинной температуры в объекте.

Представленные на графике зависимости построены при условии, что транспортного запаздывания в переходных характеристиках отдельных элементов системы нет. Несмотря на это, в переходной характеристике всей системы в целом все равно присутствует участок эквивалентный транспортному запаздыванию.

## Интерфейс RS-485: схемы подключения, рекомендации по работе с длинными линиями, рекомендации по прокладке

Интерфейс RS-485 - широко распространенный высокоскоростной и помехоустойчивый промышленный последовательный интерфейс передачи данных. Практически все современные компьютеры в промышленном исполнении, большинство интеллектуальных датчиков и исполнительных устройств, программируемые логические контроллеры наряду с традиционным интерфейсом RS-232 содержат в своем составе ту или иную реализацию интерфейса RS-485.

Интерфейс RS-485 основан на стандарте EIA RS-422/RS-485. К сожалению, полноценного эквивалентного российского стандарта не существует, поэтому в данном разделе предлагаются некоторые рекомендации по применению интерфейса RS-485.

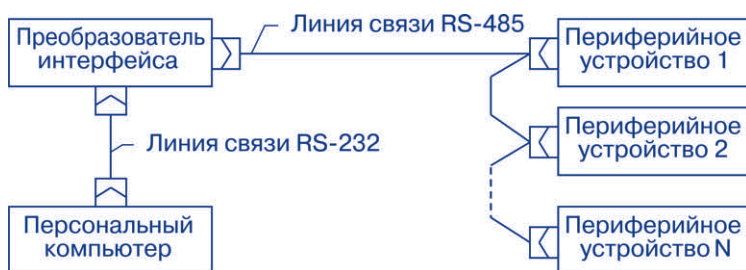
Традиционный интерфейс RS-232 в промышленной автоматизации применяется достаточно редко. Сигналы этого интерфейса передаются перепадами напряжения величиной (3...15) В, поэтому длина линии связи RS-232, как правило, ограничена расстоянием в несколько метров из-за низкой помехоустойчивости. Интерфейс RS-232 имеется в каждом PC – совместимом компьютере, где используется в основном для подключения манипулятора типа “мышь”, модема, и реже – для передачи данных на небольшое расстояние из одного компьютера в другой. Передача производится последовательно, пословно, каждое слово длиной (5...8) бит предваряют стартовым битом и заканчивают необязательным битом четности и стоп-битами. Интерфейс RS-232 принципиально не позволяет создавать сети, так как соединяет только 2 устройства (так называемое соединение “точка - точка”).



Сигналы интерфейса RS-485 передаются дифференциальными перепадами напряжения величиной (0,2...8) В, что обеспечивает высокую помехоустойчивость и общую длину линии связи до 1 км (и более с использованием специальных устройств

– повторителей). Кроме того, интерфейс RS-485 позволяет создавать сети путем параллельного подключения многих устройств к одной физической линии (так называемая “мультиплексная шина”).

В обычном PC-совместимом персональном компьютере (не промышленного исполнения) этот интерфейс отсутствует, поэтому необходим специальный адаптер - преобразователь интерфейса RS-485/232.



Наша компания рекомендует использовать полностью автоматические преобразователи интерфейса, не требующие сигнала управления передатчиком. Такие преобразователи, как правило, бывают двух видов:

- преобразователи, требующие жесткого указания скорости обмена и длины передаваемого слова (с учетом стартовых, стоповых бит и бита четности) для расчета времени окончания передачи: например, преобразователь ADAM-4520 производства компании Advantech. Все параметры задаются переключателями в самом преобразователе, причем для задания этих параметров корпус преобразователя необходимо разобрать;
- преобразователи на основе технологий “Self Tuner” и им подобных, не требующие никаких указаний вообще, и, соответственно, не имеющие никаких органов управления: например, преобразователь I-7520 производства компании ICP DAS. Данный преобразователь предпочтительнее для использования в сетях с приборами МЕТАКОН.

В автоматических преобразователях выходы интерфейса RS-485 обычно имеют маркировку “DATA+” и “DATA-“. В I-7520 и ADAM-4520 вывод “DATA+” функционально эквивалентен выводу “А” регулятора МЕТАКОН, вывод “DATA-“ - выводу “В”. В отно-

шении подключения преобразователей других производителей к устройствам НПФ “КонтрАвт” необходимо проконсультироваться с нашими специалистами.

Подключение преобразователей интерфейса ADAM-7520 и I-7520 к порту RS-232 осуществляется так называемым “модемным” кабелем. Преобразователь имеет 9-контактный разъем (DB9, гнездо), персональный компьютер может иметь разъемы как 9-контактные (DB9, штырь), так и 25-контактные (DB25, штырь). Для 9-контактного разъема распайка кабеля осуществляется “один в один” (в скобках указаны номера контактов):

DB9, штырь – к преобразователю	DB9, гнездо – к компьютеру
GND (5)	GND (5)
RxD (2)	RxD (2)
TxD (3)	TxD (3)
DTR (4)	DTR (4)
DSR (6)	DSR (6)
RTS (7)	RTS (7)
CTS (8)	CTS (8)
RI (9)	RI (9)
DCD (1)	DCD (1)

Этот стандартный кабель производится многими изготовителями.

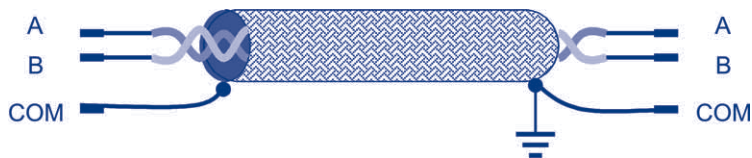
Автоматическим преобразователям, как правило, достаточно линий к контактам 2,3 и 5.

Соответствие контактов разъемов DB9 - DB25

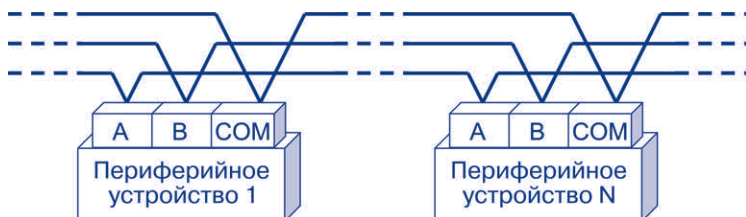
Наименование контакта	DB9	DB25
DCD	1	8
RxD	2	3
TxD	3	2
DTR	4	20
GND (сигнальная)	5	7
DSR	6	6
RTS	7	4
CTS	8	5
RI	9	22

Устройства, подключаемые к интерфейсу RS-485, характеризуются важным параметром по входу приемопередатчика: “единица нагрузки” (“Unit Load” - UL). По стандарту в сети допускается использование до 32 единиц нагрузки, т.е. до 32 устройств, каждое из которых нагружает линию в 1 UL. В настоящее время существуют микросхемы приемопередатчиков с характеристикой менее 1 UL, например - 0,25 UL. В этом случае количество физически подключенных к линии устройств можно увеличить, но суммарное количество UL в одной линии не должно превышать 32.

В качестве линии связи используется экранированная витая пара с волновым сопротивлением  $\approx 120$  Ом. Для защиты от помех экран (оплетка) витой пары заземляется в любой точке, но только один раз: это исключает протекание больших токов по экрану из-за неравенства потенциалов “земли”. Выбор точки, в которой следует заземлять кабель, не регламентируется стандартом, но, как правило, экран линии связи заземляют на одном из ее концов.



Устройства к сети RS-485 подключаются последовательно, с соблюдением полярности контактов А и В:



Как видно из рисунка, длинные ответвления (шлейфы) от магистрали до периферийных устройств не допускаются. Стандарт исходит из предположения, что длина шлейфа равна нулю, но на практике этого достичь невозможно (небольшой шлейф имеется внутри любого периферийного устройства: от клеммы до микросхемы приемопередатчика).

Качество витой пары оказывает большое влияние на дальность связи и максимальную скорость обмена в линии. Существуют специальные методики расчета допустимых скоростей обмена и максимальной длины линии связи, основанные на паспортных параметрах кабеля (волновое сопротивление, погонная емкость, активное сопротивление) и микросхем приемопередатчиков (допустимые искажения фронта сигнала). Но на относительно низких скоростях обмена (до 19200 бит/с) основное влияние на допустимую длину линии связи оказывает активное сопротивление кабеля. Опытным путем установлено, что на расстояниях до 600 м допускается использовать кабель с медной жилой сечением 0,35 мм (например, кабель КММ 2x0,35), на большие расстояния сечение кабеля необходимо пропорционально увеличить. Этот эмпирический результат хорошо согласуется с результатами, полученными расчетными методами.

Даже для скоростей обмена порядка 19200 бит/с кабель уже можно считать длинной линией, а любая длинная линия для исключения помех от отраженного сигнала должна быть согласована на концах. Для согласования используются резисторы сопротивлением 120 Ом (точнее, с сопротивлением, равным волновому сопротивлению кабеля, но, как правило, используемые витые пары имеют волновое сопротивление около 120 Ом и точно подбирать резистор нет необходимости) и мощностью не менее 0,25 Вт – так называемый “терминатор”. Терминаторы устанавливаются на обоих концах линии связи, между контактами А и В витой пары.

В сетях RS-485 часто наблюдается состояние, когда все подключенные к сети устройства находятся в пассивном состоянии, т.е. в сети отсутствует передача и все приемопередатчики “слушают” сеть. В этом случае приемопередатчики не могут корректно распознать никакого устойчивого логического состояния в линии, а непосредственно после передачи все приемопередатчики распознают в линии состояние, соответствующее последнему переданному биту, что эквивалентно помехе в линии связи. На эту проблему не так часто обращают внимания, борясь с ее последствиями программными методами, но тем не менее решить ее аппаратно несложно. Достаточно с помощью специальных цепей смещения создать в линии потенциал, эквивалентный состоянию отсутствия передачи (так называемое состояние “MARK”: передатчик включен, но передача не ве-

дется). Цепи смещения и терминатор реализованы в преобразователе I-7520. Для корректной работы цепей смещения необходимо наличие двух терминаторов в линии связи.

В сети RS-485 возможна конфликтная ситуация, когда 2 и более устройства начинают передачу одновременно. Это происходит в следующих случаях:

- в момент включения питания из-за переходных процессов устройства кратковременно могут находиться в режиме передачи;
- одно или более из устройств неисправно;
- некорректно используется так называемый “мультимастерный” протокол, когда инициаторами обмена могут быть несколько устройств.

В первых двух случаях быстро устранить конфликт невозможно, что теоретически может привести к перегреву и выходу из строя приемопередатчиков RS-485. К счастью, такая ситуация предусмотрена стандартом и дополнительная защита приемопередатчика обычно не требуется.

В последнем случае необходимо предусмотреть программное разделение канала между устройствами - инициаторами обмена, так как в любом случае для нормального функционирования линия связи может одновременно предоставляться только одному передатчику. В протоколе обмена, реализованном в устройствах и программном обеспечении НПФ “КонтрАвт”, мультимастерный режим не поддерживается.

## Сигнализация в регуляторах МЕТАКОН

Можно утверждать, что решение задачи по автоматизации технологических процессов нельзя считать полным и профессиональным, если это решение не предусматривает сигнализацию событий, определяющих работу системы в целом. Чтобы продемонстрировать важность организации сигнализации, приведем словесные описания возможных событий:

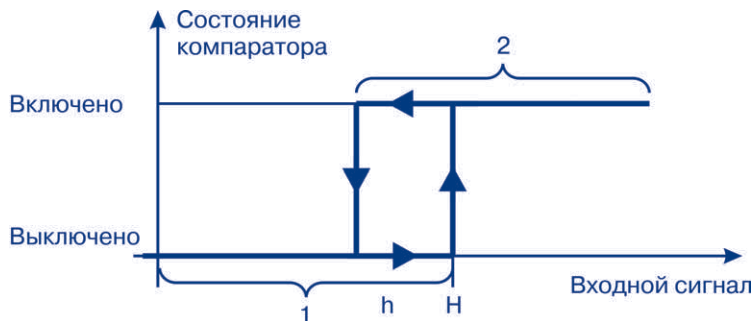
- «Обрыв (или замыкание) датчика»;
- «Регулятор обесточен»;
- «Неконтролируемый перегрев сверх допустимого уровня»;
- «Значение технологического параметра вышло за допустимый интервал (ниже или выше)»;
- «Недогрев. Технологический процесс запускать нельзя»;
- «Значение технологического параметра достигло необходимого уровня, начинается отсчет времени с помощью реле времени».

Таким образом, сигнализация позволяет выявлять аварийные ситуации и ситуации нормального функционирования системы, а также организовать выполнение логических функций, привязанных к значению измеренного технологического параметра.

Для организации сигнализации в регуляторах серии МЕТАКОН предусмотрены дополнительные дискретные выходы - сигнализаторы, описанные в Руководстве по эксплуатации как **компараторы L и H**. Компараторы **L** и **H** имеются во всех каналах измерения одноканальных и многоканальных приборов серии МЕТАКОН.

Компаратор представляет собой пороговое логическое устройство, выход которого может принимать только два значения в зависимости от соотношений измеренного сигнала и параметров, определяющих условия срабатывания сигнализации (порогов или уставок). Простейшая зависимость (т.е. функция компаратора) показана на рис. 1.





Обратим внимание на то, что в области порогов  $h$  и  $H$  в поведении компаратора наблюдается гистерезис и состояние выхода компаратора зависит не только от соотношения входного сигнала и порогов, но и от предшествующей истории, т.е. от того, каким путем входной сигнал приближается к порогам. Если входной сигнал находится в области 1 и увеличивается, то компаратор переходит в состояние «ВКЛЮЧЕНО» при достижении порога  $H$ , если входной сигнал находится в области 2 и уменьшается, то компаратор переходит в состояние «ВЫКЛЮЧЕНО» при достижении порога  $h$ .

Для чего же вводят гистерезис в компараторы? Как правило, измеренный сигнал имеет как регулярную составляющую (постоянную или плавно меняющуюся), так и случайную, вызванную действием внешних электромагнитных помех. В отсутствие гистерезиса, при подходе измеренного сигнала к пороговому значению случайная компонента вызывает многократные срабатывания компаратора, что нежелательно в системе сигнализации (дребезг контактов, хаотические срабатывания различных устройств и проч.). Однако, если выбрать зону гистерезиса ( $H-h$ ) чуть больше, чем размах случайных изменений измеренного сигнала, то компаратор будет срабатывать только один раз, повторных возвратов в исходное состояние не будет. Таким образом, исключаются случайные срабатывания компаратора, его состояния фиксируются более четко.

Для того, чтобы в регуляторах серии МЕТАКОН запрограммировать работу компаратора необходимо определить выполняемую функцию и задать пороги.

В регуляторах серии МЕТАКОН-5Х2 доступны для программирования 4 разновидности функций и два варианта задания порогов (всего 8 вариантов). Каждый компаратор можно запрограммировать независимо от других.

В регуляторах МЕТАКОН-5Х3 и МЕТАКОН-5Х4 функции компараторов фиксированы.

В зависимости от модификации регулятора, выход компаратора может быть реализован на п-р-п транзисторе с открытым коллектором (24В/150мА Max) или на электромеханическом реле с контактами на переключение (250В АС/ 3А).

## ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ПРОГРАММА

Измерители  
технологических  
параметров

**МЕТАКОН-512/522/532/562**



Регуляторы-измерители  
для управления  
технологическими  
процессами

**МЕТАКОН-512/522/532/562**  
**T-424, МЕТАКОН-515**  
**МЕТАКОН-513/523/533**  
**МЕТАКОН-514/524/534**  
**МЕТАКОН-613/614**



Реле времени

**ЭРКОН – 214/224**



Измерительные  
нормирующие  
преобразователи  
аналоговых сигналов

**ПСТ, ПНТ**



Устройства питания  
и коммутации

**БП, БПР, БС, БР, ФС**



Программное  
обеспечение для  
построения систем  
сбора данных

**RNet**



Термопреобразователи сопротивления медные и  
платиновые

Преобразователи термоэлектрические кабельные

Термопреобразователи с унифицированным  
выходным сигналом



Информация о продукции в каталогах и на сайте [www.contravt.ru](http://www.contravt.ru)

## Тел./факс

(8312) 66-16-94, 66-16-04, 66-14-05, 66-23-09

## E-mail

sales@contravt.nnov.ru

## Internet

www.contravt.ru

## Почтовый адрес

Россия, 603107, Нижний Новгород, а/я 21

## Местонахождение

Нижний Новгород, пр. Гагарина, 168, офис 318

## Проезд

авт. 30, 37, 62, м.такси 3, 103, 4, 104, 143, 16, 39, 51,  
тролл. 13, остановка Завод Нител

## филиалы НПФ КонтрАвт

### Башкортостан

450075, Уфа, а/я7079  
Маслова Лариса Ивановна  
сот. 8-917 416-23-57  
(3472) 35-23-42  
maslovali@bashnet.ru

### Волгоградская, Астраханская, Саратовская области

400112, Волгоград, а/я 602  
Бондаренко Александр Александрович  
сот. 8-902 314-83-62  
contravt-volga@vlink.ru, abond@vlink.ru

### Татарстан

420066, Казань, ул.Ибрагимова, 73-6  
Липин Виктор Анатольевич  
сот. 8-903 343-77-30  
lipvi@mail.ru