

## Лабораторная работа № 9

### ИЗУЧЕНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

**Цель работы:** Изучение принципа действия систем автоматического контроля технологических параметров на примере приборов следящего уравнивания типа КСМ4 и экспериментальное определение основных параметров контролируемого объекта (термостата) по его переходной характеристике.

**Оборудование и приборы:** мостовые измерители температуры.

#### 9.1. Общие сведения

Обеспечение унифицированными техническими средствами разнообразных систем контроля, регулирования и управления технологическими процессами проводится в рамках Государственной системы промышленных приборов и средств автоматизации (ГСП).

Примером таких средств ГСП являются приборы автоматического следящего уравнивания. К ним относятся, в частности, измерительные мосты типа КСМ4 и потенциометры типа КСП4. Эти устройства относятся к классу вторичных приборов (преобразователей) и предназначены для автоматического контроля и регулирования физических величин, которые могут быть преобразованы в электрические сигналы.

Основное отличие измерительных мостов от потенциометров заключается в том, с какими типами датчиков, а точнее первичных преобразователей (или чувствительных элементов), эти устройства могут работать.

Автоматические измерительные мосты рассчитаны на работу с *параметрическими* датчиками, преобразующими контролируемую физическую величину в активное сопротивление (электрический параметр).

Мосты КСМ4 используются, главным образом, для измерения и регулирования температуры, поэтому комплектуются одним или несколькими *термопреобразователями сопротивления* (ТС) стандартных градуировок. Но в принципе возможно применение и других первичных преобразователей: фотосопротивлений для измерения освещенности; тензосопротивлений для измерения деформаций и т.п.

Автоматические потенциометры рассчитаны на работу совместно с *генераторными датчиками*, преобразующими контролируемую физическую величину в ЭДС постоянного тока (ЭДС генерируется).

Потенциометры КСП4, как и мосты КСМ4, могут использоваться для измерения и регулирования температуры. В этом случае они комплектуются одним или несколькими *термоэлектрическими преобразователями (термопарами)* стандартных градуировок.

Потенциометры также можно использовать и для других измерений. Подключение измерительных электродов позволяет проводить электрохимические измерения, например определение pH растворов.

Фотоэлементы дают возможность проводить оптические измерения. И, конечно же, возможно непосредственное измерение небольших постоянных напряжений.

#### 9.2. Определение температуры измерительными мостами

В измерительной технике для повышения точности часто применяют метод, в основе которого лежит сравнение значения измеряемой величины со значением величины, воспроизводимой специальной мерой. В этом случае измеряется разностный (дифференциальный) сигнал, а так как мера обычно обладает малой погрешностью, то обеспечивается высокая точность измерения.

Именно этот метод и лежит в основе работы измерительных мостов и

потенциометров.

Обычно величину, воспроизводимую мерой, делают регулируемой и в процессе измерения устанавливают ее значение точно равным значению измеряемой величины.

В измерительных мостах в качестве такой меры применяются сопротивления – реохорды, с помощью которых уравнивается сопротивление термопреобразователя, изменяющееся при изменении температуры объекта [1].

В потенциометрах в качестве меры применяют обычно источники стабильного напряжения с регулируемым выходом. В ходе измерений с помощью напряжения такого источника компенсируется ЭДС, генерируемая датчиком. В этом случае такой метод измерения называют компенсационным.

В обоих случаях задача последующих устройств (приборов) – только зафиксировать факт равенства измеряемой величины и меры, поэтому требования к ним существенно снижаются.

В качестве примера рассмотрим принцип действия измерительного моста в ручном режиме.

На рис. 9.1.а представлена мостовая схема измерения температуры  $t$  некоторого контролируемого объекта  $KO$ . Основу такой схемы составляет замкнутая цепь из четырех резисторов  $R_T$ ,  $R_P$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ , образующих так называемые плечи моста. Узлы соединения этих резисторов называют вершинами ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ), а линии соединения противоположных вершин ( $a-b$ ,  $c-d$ ) – диагоналями моста. К одной из диагоналей  $c-d$  (рис. 9.1) подводится напряжение питания, другая диагональ  $a-b$  является измерительной или выходной. Именно такая схема и называется мостовой, что дало название и всему измерительному устройству.

Резистор  $R_T$  представляет собой первичный измерительный преобразователь температуры (термосопротивление или терморезистор), находящийся в зоне измерения температуры и включаемый в измерительную схему с помощью проводов длиной до нескольких метров.

Основное требование к такому термопреобразователю – линейная зависимость его активного сопротивления  $R_{TC}$  от температуры в требуемом диапазоне измерений:

$$R_T = R_0[1 + \alpha \cdot (t - t_0)] \quad (9.1)$$

где  $R_0$  – номинальное сопротивление термопреобразователя при температуре  $t_0$  (обычно  $t_0 = 20^\circ\text{C}$ );

$\alpha$  – температурный коэффициент, зависящий от материала термопреобразователя.

Чаще всего используются металлические термосопротивления ТСМ (медные) и ТСП (платиновые), иногда их называют металлическими терморезисторами (МТР).

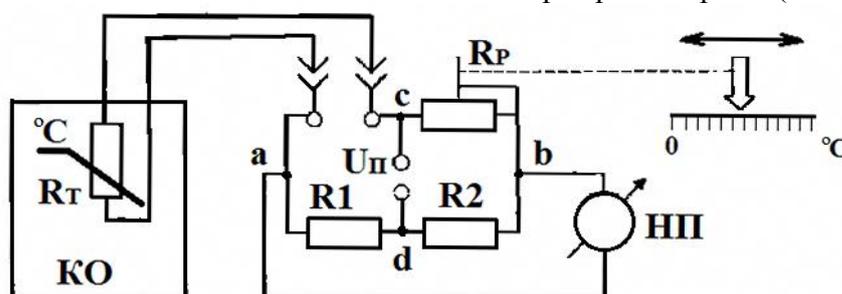


Рис. 9.1. Измерение температуры измерительным мостом в ручном режиме

Переменный резистор  $R_P$  представляет собой высокоточный реохорд (мера), о котором говорилось выше, и служит для уравнивания изменяющегося  $R_T$ . Резисторы  $R_1$  и  $R_2$  дополняют мостовую схему. В случае равенства их сопротивлений  $R_1 = R_2$  мостовую схему называют *симметричной*.

Кроме того, на рис. 9.1 показаны ноль-прибор (НП) для фиксирования равновесия моста и указатель со шкалой, отградуированной в градусах Цельсия. Шкала температур

располагается на лицевой панели прибора параллельно движению движка реохорда. Ноль-прибор представляет собой обычный стрелочный измеритель напряжения.

При изменении температуры в зоне измерения контролируемого объекта  $KO$  изменяется сопротивление термодатчика  $R_T$ . В результате нарушится равновесие моста и на ноль-приборе стрелка отклонится от нулевой отметки в положительную или отрицательную сторону. Для того, чтобы узнать установившуюся температуру в измеряемой зоне необходимо установить равновесие моста.

Из электротехники известно, что *условие баланса* (равновесия) моста реализуется при равенстве произведения сопротивлений противоположных плеч моста с учетом сопротивления проводов, которыми подключается датчик:

$$(R_T + R_{II}) R_2 = R_P \cdot R_1 \quad (9.2)$$

где  $R_{II} = R_{III} + R_{II2}$  – сумма сопротивлений проводов.

Для симметричного моста ( $R_1 = R_2$ ) будем иметь:

$$(R_T + R_{II}) R_2 = R_P \quad (9.3)$$

В этом случае напряжение в измерительной диагонали будет отсутствовать и ноль-прибор покажет ноль.

Чтобы достичь равновесия, необходимо перемещать движок переменного резистора  $R_P$  в ту или другую сторону, пока стрелка ноль-прибора не установится на нулевую точку (на ноль). При этом указатель шкалы температур, жестко связанный с движком реохорда  $R_P$ , перемещается вместе с ним (штриховая линия на рис. 9.1 обозначает механическую связь движка и указателя). Когда установится равновесие моста, то указатель шкалы температур остановится напротив значения измеренной температуры.

Снятие показаний производится только в моменты равновесия, поэтому такие схемы и устройства часто называют уравновешенными измерительными мостами.

Основным недостатком измерительной схемы, представленной на рис. 9.1, является наличие погрешности, вызванной сопротивлением проводов  $R_{II}$ , которое может изменяться в зависимости от температуры окружающей среды.

Исключить эту погрешность можно применив трехпроводный способ подключения датчика (см. рис. 9.2).

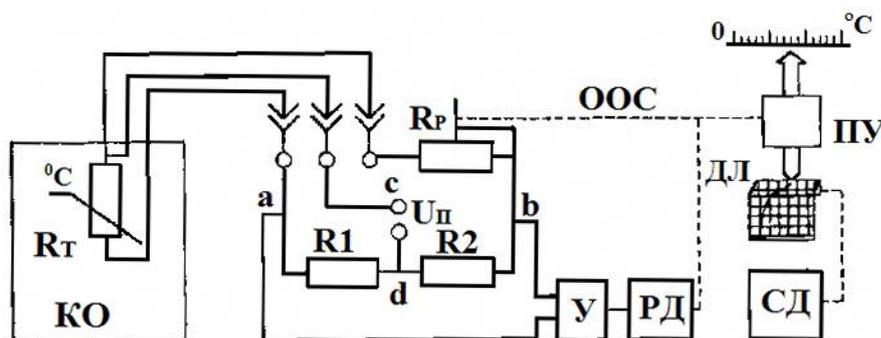


Рис. 9.2. Измерение температуры измерительным мостом в автоматическом режиме

Сущность способа состоит в том, что с помощью третьего провода вершина "с" диагонали питания перемещается непосредственно к термосопротивлению, а два оставшихся провода  $R_{III}$  и  $R_{II2}$  при этом оказываются в разных соседних плечах, т.е. условие баланса симметричного моста (9.3) преобразуется следующим образом:

$$R_{TC} + R_{III} = R_P + R_{II2} \quad (9.4)$$

Таким образом, для полного исключения погрешности достаточно применить одинаковые провода ( $R_{III} = R_{II2}$ ) при подсоединении датчика к мостовой схеме.

Для реализации автоматического режима измерения достаточно вместо ноль-прибора (рис. 9.1) в измерительную диагональ подключить фазочувствительный

усилитель  $U$  и реверсивный двигатель  $PD$  с редуктором (рис. 9.2).

В зависимости от характера изменения температуры объекта двигатель  $PD$  будет в ту или иную сторону перемещать движок реохорда  $R_P$  до тех пор, пока не установится баланс. Напряжение в диагонали  $a-b$  исчезнет, и двигатель остановится.

Кроме того, двигатель будет перемещать индикаторную стрелку и пишущий узел  $ПУ$ , если необходимо зафиксировать показания на диаграммной ленте  $ДЛ$ . Диаграммная лента перемещается с постоянной скоростью синхронным двигателем  $СД$ .

Данная измерительная установка является *системой автоматического контроля* (САК) температуры и относится к классу следящих систем с отрицательной обратной связью.

Функцию обратной связи выполняет механическая связь вала двигателя  $PD$  с реохордом  $R_P$ . Задатчиком является термопреобразователь  $R_T$ . Мостовая схема выполняет в этом случае две функции: сравнивающего устройства ( $\Delta R = R_T - R_P$ ) и преобразовательного устройства ( $\Delta R$  в  $\Delta U$ ). Напряжение  $\Delta U$  является сигналом ошибки.

Реверсивный двигатель является исполнительным элементом, а выходной величиной считается перемещение  $l$  стрелки (или пишущего узла), т.к. целью любой САК является выдача информации о контролируемой величине в виде, удобном для восприятия человеком.

Реальная схема измерительного моста КСМ4 несколько сложнее схемы, которая представлена на рис. 9.2.

### 9.3. Основные свойства объектов автоматических систем

Каждый объект автоматике представляет собой динамическую систему со своими входными и выходными величинами.

Основными свойствами объектов автоматических систем являются их *устойчивость* и *инерционность*. Определить основные свойства объекта автоматике проще всего по его переходной характеристике.

*Переходной характеристикой*, или *кривой разгона*, называется реакция объекта (звена или всей системы) на единичное ступенчатое воздействие. Обычно переходная характеристика обозначается как  $h(t)$ .

Переходная характеристика устойчивых объектов апериодическая (кривая 1 рис. 9.3) и после некоторых колебаний стремится к установившемуся значению  $Y_{уст}$ . Такие объекты называют также *статическими*, т.к. для них всегда можно получить зависимость установившегося значения выходной величины при постоянстве входного регулирующей или возмущающего воздействия, т.е. статическую характеристику.

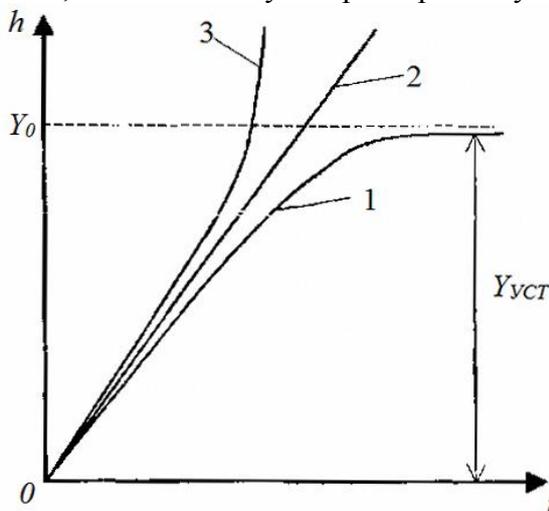


Рис. 9.3. Переходные характеристики объектов контроля (регулирования) различного типа

Кроме того, для таких объектов характерно отличие установившегося значения от заданной величины, обусловленное наличием потерь энергии и называющееся *статической погрешностью*.

Примерами устойчивых объектов являются, в частности, электронагревательные приборы или электродвигатели, выходной величиной которых считается угловая скорость.

Линейный характер переходной характеристики (кривая 2 рис. 9.3) свойственен *нейтральным* или *астатическим* объектам, т.е. не имеющим статического (установившегося) режима. В автоматике такие объекты относят к интегрирующим звеньям.

Типичным примером нейтрального астатического объекта является электродвигатель, если за выходную величину принять угол поворота его вала.

Существуют также *неустойчивые* объекты (кривая 3 рис. 9.3). Неустойчивыми являются, например, объекты, в которых происходит экзотермические или ядерные реакции.

Чем выше степень устойчивости объекта, тем более простыми методами можно обеспечить требуемое качество регулирования. Работа неустойчивых объектов без автоматических регуляторов невозможна в принципе.

*Инерционность* объектов оценивается двумя параметрами – временем чистого запаздывания  $\tau_3$ , и постоянной времени  $T$  объекта.

Свойства объекта можно определить аналитическим путем, решая уравнения статики и динамики его работы, либо экспериментально. В инженерной практике свойства промышленных объектов обычно выявляют экспериментальным путем, снимая их переходные характеристики обычно с помощью соответствующих систем автоматического контроля.

На рис. 9.4 приведен пример определения времени запаздывания  $\tau_3$  и постоянной времени  $T$  устойчивого объекта по его переходной характеристике.

Первый участок при  $0 < t < \tau_3$  (рис. 9.4) образует так называемое звено чистого запаздывания, а второй, при  $t > \tau_3$ , является аperiodическим звеном первого порядка.

Переходная характеристика такого звена при нулевых начальных условиях описывается уравнением

$$t = t_y(1 - e^{-\frac{t - \tau_3}{T}}) \quad (9.5)$$

где  $t$ ,  $t_y$  и  $t_0$  – текущее, установившееся и начальное значения температуры объекта.

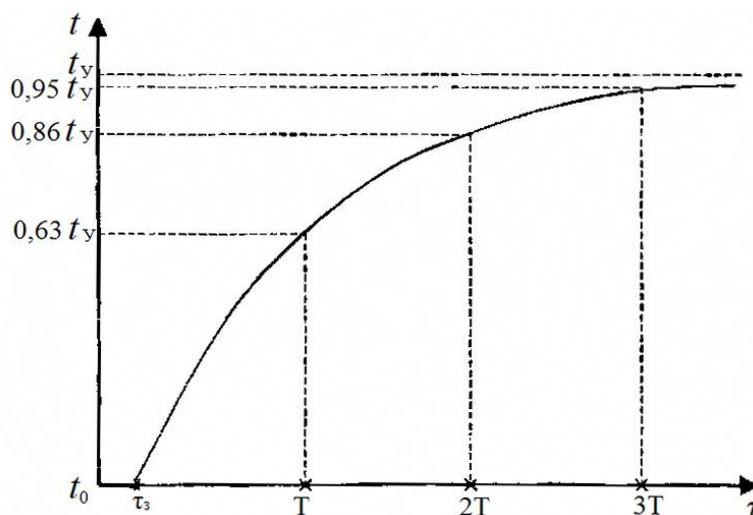


Рис. 9.4. Переходная характеристика контролируемого объекта

Если принять  $t - \tau_3 = T$  и  $t_0 = 0$ , тогда можно записать:

$$t_1 = 0,63 t_y \quad (9.6)$$

Таким образом, *постоянной времени  $T$*  процесса (объекта) называется время от начала изменения выходной величины ( $\tau = \tau_3$ ) до момента достижения 63% установившегося значения без учета начальных условий.

#### 9.4. Описание лабораторной установки

Основу лабораторной установки составляет измерительный мост КСМ4. Данный прибор является двенадцатиканальным, т.е. к нему можно подсоединить до двенадцати термопреобразователей сопротивления (датчиков температуры).

Эти датчики автоматически поочередно подключаются к измерительной схеме моста с помощью специального переключателя. В момент установления равновесия измерительной схемы печатающий механизм каретки ставит точку с порядковым номером канала на диаграммной ленте. Номер подключенного канала можно также увидеть на специальном индикаторе, расположенном справа от пишущего узла.

Все основные узлы моста КСМ4 располагаются на выдвижном (из корпуса) шасси. Там же находятся и органы управления мостом. Выключатели "Прибор" и "Диаграмма" – спереди, в правом нижнем углу. Переключатель скорости перемещения ленты – в левом верхнем углу, а переключатель периода регистрации – слева, на боковой стенке шасси.

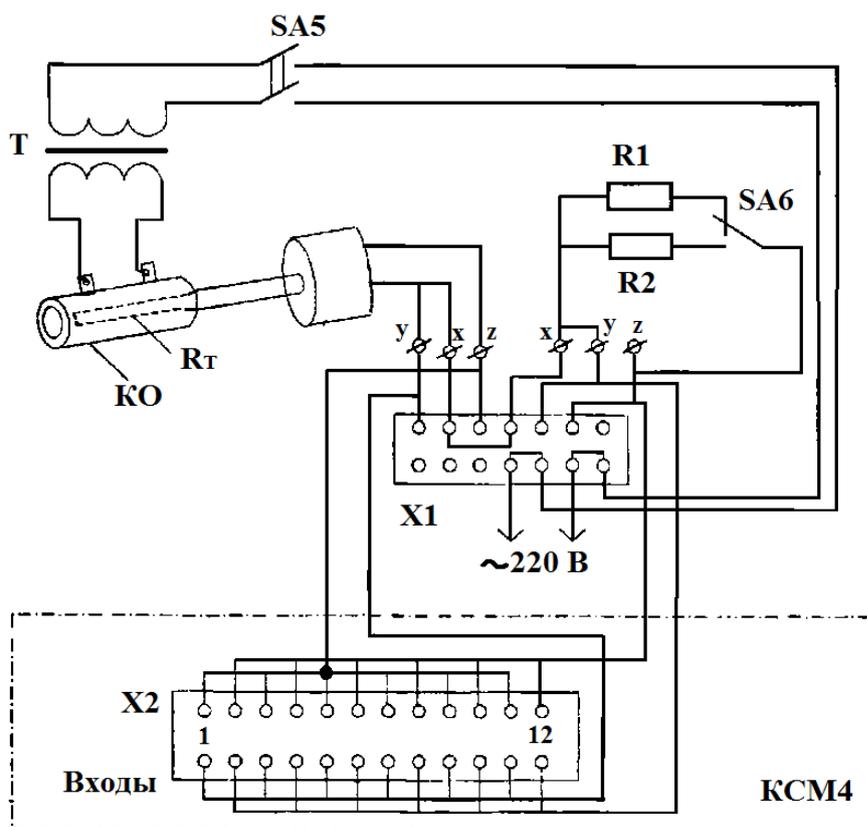


Рис. 9.5. Схема лабораторной установки

Мост КСМ4 может работать в двух режимах: в режиме автоматического измерения (контроля) и в режиме автоматического регулирования температуры. Причем для второго режима необходимо задействовать специальный релейный блок, реализующий двух- или трехпозиционное регулирование. *В данной работе эти блоки не задействованы.*

Объектом контроля  $KO$  (рис. 9.5) может являться любой реальный объект (термостат, радиатор, корпус транзистора и т.п.). В данном случае (рис. 9.5) его функции выполняет остеклованный резистор, выдерживающий нагрев до 150 °С и обладающий малой инерционностью, что ускоряет процесс снятия переходной характеристики. Нагрев объекта контроля производится от сети через согласующий трансформатор  $T$ . Чувствительный элемент датчика температуры (термосопротивление)  $R_T$  расположен

внутри исследуемого объекта и по трехпроводной схеме подключен к внешним колодкам моста КСМ4 ко всем нечетным каналам (с 1 по 11).

Для определения реального масштаба к тем же колодкам, но к четным каналам (со 2 по 12) подключено постоянное сопротивление ( $R1$  или  $R2$  на макете, рис. 9.5), имитирующее объект с постоянной температурой.

### 9.5. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с лабораторной установкой. Найти основные органы управления моста КСМ4. Определить, какая скорость перемещения диаграммной ленты и какой период регистрации установлены.

2. Включить мост КСМ4 в режиме автоматического измерения (контроля) и записи на диаграммную ленту. Переключателем  $SA6$  выбрать один из масштабирующих резисторов  $R1$  или  $R2$ . Включить подогреватель  $OP$  выключателем  $SA9$ .

3. Убедиться, что переходной процесс нагрева объекта начался и фиксируется на диаграммной ленте нечетными каналами, а четные дают прямую линию.

Дождаться выхода кривой переходного процесса (разгона) на установившийся режим  $t_y = \text{const}$  и выключить подогреватель.

4. Определить масштаб  $\mu_R$  [Ом/кл] на диаграммной ленте, зная, что  $R_0 = 50$  Ом при  $t_0 = 20$  °С. Значения сопротивлений  $R1$  и  $R2$  смотреть на макете установки. По полученному масштабу определить  $R_y(t_y)$  и  $R_{MAX}(t_{MAX})$  (на правом краю ленты). С учетом уравнения (9.1) рассчитать  $t_y$  и  $t_{MAX}$  соответственно. Получить масштаб  $\mu_t$  [°С/кл] при  $\alpha_{ТСП} = 3,97 \cdot 10^{-3}$  °С<sup>-1</sup>.

5. Зная скорость перемещения диаграммной ленты, определить время запаздывания  $\tau_3$  (если оно есть) и постоянную времени объекта  $T$ .

*Примечание:* шаг (одна клетка) диаграммной ленты равна 2,5 мм.

### 9.6. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Мостовая схема измерения температуры (рис. 9.1).
3. По характеру кривой переходного процесса определить устойчивость объекта.
4. Рассчитать и отметить на полученной кривой разгона параметры  $t_y$ ,  $t_{MAX}$ ,  $\tau_3$ ,  $T$ .

### 9.7. Контрольные вопросы

1. Что такое ГСП?
2. В чем основное отличие измерительных мостов от потенциометров?
3. В чем сущность метода сравнения с мерой.
4. Принцип действия измерительных мостов.
5. Измерение температуры мостовой схемой в ручном режиме.
6. В чем преимущество трехпроводного способа подключения датчика (термосопротивления)?
7. Определение инерционных свойств объекта по кривой разгона (переходной характеристике).