

**Федеральное агентство по образованию
Пермский государственный технический университет
Кафедра электрификации и автоматизации горных
предприятий**

Утверждено на
заседании кафедры
“ ___ ” _____ 2007 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И ПИД-РЕГУЛЯТОРОВ

Аристов Е.В., Хузин Р.А.

Методическое руководство к лабораторной работе для
студентов всех специальностей и форм обучения
горно-нефтяного факультета

Пермь - 2007

Цели работы:

1. Ознакомление с основными типами тепловых измерительных преобразователей;
2. Ознакомление с принципами построения и модификациями ПИД-регуляторов;
3. Снятие статических характеристик терморезистора и параметров ПИД-регулятора.

Основные положения

Тепловыми называют преобразователи, принцип действия которых основан на использовании тепловых процессов (нагрева, охлаждения, теплообмена) и входной величиной которых является температура. Тепловые преобразователи широко применяют как преобразователи не только температуры, но и таких величин, как тепловой поток, скорость потока газа или жидкости, расхода, давление газов, уровень жидкости и т.д. При построении тепловых преобразователей наиболее часто используют такие явления, как возникновение термо-ЭДС, зависимость сопротивления вещества от температуры.

Термоэлектрические преобразователи

Термоэлектрический преобразователь (термопара) представляет собой чувствительный элемент, состоящий из двух разных проводников или полупроводников, соединенных электрически, и преобразующий контролируемую температуру в ЭДС. Принцип действия термоэлектрического преобразователя основан на использовании термоэлектродвижущей силы, возникающей в контуре из двух разнородных проводников (термо-ЭДС возникает только в спаях разнородных материалов), места соединения (спаи) которых нагреты до различных температур (рис. 1.а.). Знак и значение термо-ЭДС в цепи зависят от типа материала и разности температур в местах спаев. При небольшом перепаде температур между спаями термо-ЭДС можно считать пропорциональной разности температур

$$E_{AB} = K_{SAB} \Delta \theta. \quad (1)$$

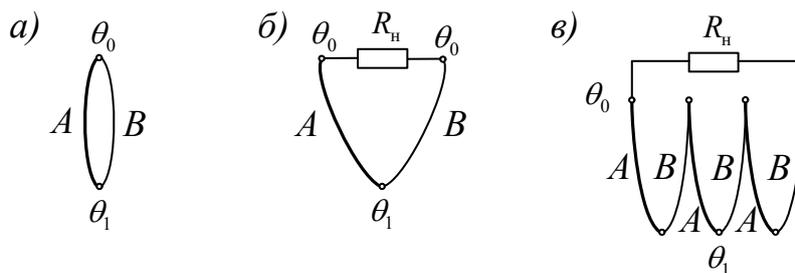


Рис.1. Термопары

Если к термопаре подключить милливольтметр, то по значению термо-ЭДС можно определять температуру (рис. 1.б.). Чтобы получить достоверные результаты, необходимо один спай термопары, называемый рабочим, поместить в среду с температурой θ_1 , подлежащей измерению, а температуру θ_0 других, нерабочих (холодных, свободных), спаев поддерживать постоянной.

Обычно термо-ЭДС не рассчитывают аналитически, а определяют по градуировочным таблицам или графикам, получаемым экспериментально, для различных материалов при температуре холодных спаев $\theta_0=0$.

В качестве материалов для термопар используют различные драгоценные металлы (платину, золото, иридий, родий и их сплавы), а также неблагородные металлы (сталь, никель, хром, сплавы нихром, копель, алюмель и др.) и полупроводниковых материалов (кремний, селен и др.).

Чтобы повысить выходную ЭДС, используют последовательное включение термопар, образующее термобатарею (рис. 1.в.)

В зависимости от назначения термопары делятся на погружные, предназначенные для измерения температуры жидкости и газообразных сред, и поверхностные, предназначенные для измерения температуры поверхности твердого тела. В зависимости от инерционности различают термопары малоинерционные, тепловая постоянная времени которых не превышает 5 с для погружных и 10 с для поверхностных; средней инерционности – соответственно не более 60 и 120 с и большой инерционности, с тепловой постоянной до 180 и 300 с.

К достоинствам термопар необходимо отнести возможность измерений с большим диапазоном температур, простоту устройства, надежность в эксплуатации.

Недостатки – невысокая чувствительность, большая инерционность, необходимость поддерживать постоянной температуру свободных спаев.

Чувствительные элементы, как правило, помещают в тонкостенные металлические гильзы и герметизируются.

Терморезистивные преобразователи

Принцип действия данных преобразователей основан на свойстве проводников и полупроводников изменять свое электрическое сопротивление при изменении температуры.

Для терморезистивных преобразователей используют материалы, обладающие высокой стабильностью ТКС (температурный коэффициент сопротивления), высокой воспроизводимостью электрического сопротивления при данной температуре, значительным удельным электрическим сопротивлением, высоким значением ТКС, стабильностью химических и физических свойств при нагревании, инертностью к воздействию исследуемой среды. К таким материалам в первую очередь относятся платина, медь, никель, вольфрам и др. Однако наиболее широко применяют платиновые и медные терморезисторы.

Сопротивление платиновых терморезисторов в диапазоне температур от 0 до 650 °С описывается уравнением:

$$R_{\theta} = R_0(1 + A\theta + B\theta^2), \quad (2)$$

где R_{θ} , R_0 – сопротивления преобразователя при рабочей и нулевой температуре;

A и B – постоянные коэффициенты.

К недостаткам платиновых преобразователей температуры относится довольно высокая загрязняемость платины парами металлов (особенно железа) при высоких температурах, сравнительно невысокая химическая стойкость в восстановительной среде, вследствие чего материал становится хрупким, теряет стабильность характеристики.

Медные терморезисторы широко используют в диапазоне температур от 50 до 180 °С благодаря низкой стоимости, довольно высокой стойкости к коррозии. К недостаткам медных терморезисторов относится высокая окисляемость меди при нагревании, вследствие чего их применяют в указанном сравнительно узком диапазоне температур в средах с низкой влажностью и при отсутствии агрессивных газов.

Никель, химически стойкий материал даже при высоких температурах, имеет сложную зависимость сопротивления от температуры и невысокую ее воспроизводимость. Тугоплавкие металлы – вольфрам, молибден, тантал, ниобий – применяют мало из-за влияния температуры на структуру металл, что делает его хрупким. Сплавы обладающие более высоким удельным сопротивлением, чем чистые металлы, в качестве материалов для преобразователей не используют из-за сравнительно низкого ТКС, значение которого в значительной степени зависит от количественного и качественного состава примесей.

Полупроводниковые терморезисторы отличаются от металлическими большими значениями ТКС, а также меньшими размерами и инерционностью. Недостатками полупроводниковых терморезисторов, существенно снижающих их эксплуатационные качества, является нелинейность зависимости сопротивления от температуры, значительный разнос как номинальных значений сопротивлений разных образцов, так и их ТКС.

При измерении температуры нагрузочный ток протекающий через терморезистор должен быть мал. Если через терморезистор пропускать большой фиксированный ток, то перегрев терморезистора по отношению к окружающей среде может стать значительным. Установившееся значение перегрева и соответственно сопротивления при этом будет определяться условиями теплопередачи поверхности терморезистора. Если перегретый терморезистор поместить в среду с переменными теплофизическими характеристиками, то появляется возможность измерения ряда физических величин, например, скорости потока жидкости и газов, плотности газов и т.п.

Чувствительность проволочных медных терморезисторов равна:

$$K_{SM} = \frac{dR_{\theta}}{d\theta} = \alpha R_0 \quad (3)$$

платиновых –

$$K_{ст} = R_0 (A + 2B\theta). \quad (4)$$

Чувствительность проволочных медных терморезисторов постоянна, а чувствительность платиновых изменяется с изменением температуры. При одинаковых значениях R_0 чувствительность медных терморезисторов выше.

Основными источниками погрешностей терморезисторов являются неточность подгонки сопротивления R_0 при температуре 0°C и отклонение отношения W_{100} сопротивления R_{100} при 100°C к сопротивлению R_0 , нестабильность этих параметров во времени, дополнительный нагрев от прохождения рабочего тока, нестабильность сопротивления съемных проводов, подходящих от измерительной схемы к преобразователю и д.р. Погрешности, возникающие за счет изменения R_0 и W_{100} , имеют разные знаки, поэтому частично компенсируются.

Промышленные терморезисторы выпускаются в виде чувствительных элементов в защитных корпусах. Чувствительный элемент современного платинового терморезистора имеет вид спирали, помещенной в канавки двух- или четырехканального керамического каркаса и уплотненной порошкообразным оксидом алюминия. Оксид алюминия является хорошим электрическим изолятором, обладает большой теплостойкостью и хорошей теплопроводностью. Чувствительный элемент медных терморезисторов представляет собой бескаркасную обмотку из медной изолированной проволоки, покрытой фторопластовой пленкой и помещенной в металлический защитный чехол.

Пирометры

Рассмотренные ранее преобразователи для измерения температуры предусматривают непосредственный контакт между чувствительным элементом и измеряемым объектом или средой. Верхний предел применения таких измерительных преобразователей ограничивается термической стойкостью применяемых чувствительных элементов и лежит в пределах до 2500°C . В случаях измерения более высоких температур или невозможности непосредственного контакта датчика со средой применяют бесконтактные измерители – пирометры.

В основе бесконтактных методов измерения температуры лежит температурная зависимость излучения абсолютно черного тела (АТЧ), т.е. тела, способного полностью поглощать попадающее на него излучение любой длины волны. Однако реальные тела полностью не поглощают падающее излучение и характеризуются коэффициентом поглощения a_λ , определяющим способность поглощать излучение исследуемым телом по сравнению с АТЧ.

По формуле Планка светимость АТЧ R_λ^* однозначно определяется его абсолютной температурой θ

$$R_\lambda^* = C_1 \lambda^{-5} \left(\frac{1}{e^{C_2(\lambda\theta^{-1})}} \right), \quad (5)$$

где $C_1=2\pi h^2$; $C_2=hc/K$; h – постоянная Планка; K – постоянная Больцмана; λ – длина волны.

Светимость любого тела R_λ , через светимость R_λ^* АЧТ, можно выразить в виде

$$R_\lambda = a_\lambda R_\lambda^* , \quad (6)$$

где a_λ – коэффициент поглощения исследуемого тела.

Эти фундаментальные законы позволяют использовать оптические бесконтактные методы для измерения температуры реальных тел.

Пиromетры делятся на радиационные, яркостные и цветовые. Радиационные пиromетры применяются для измерения температур от 0 до 2500 °С.

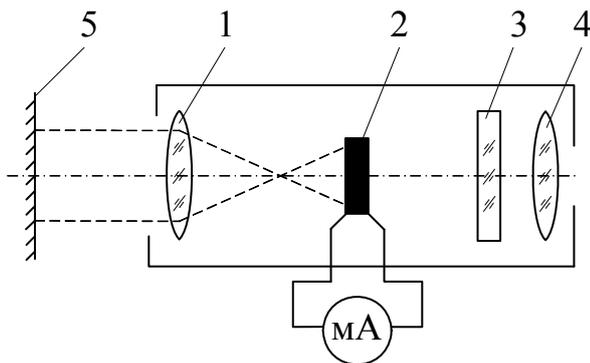


Рис.2. Радиационный пиromетр

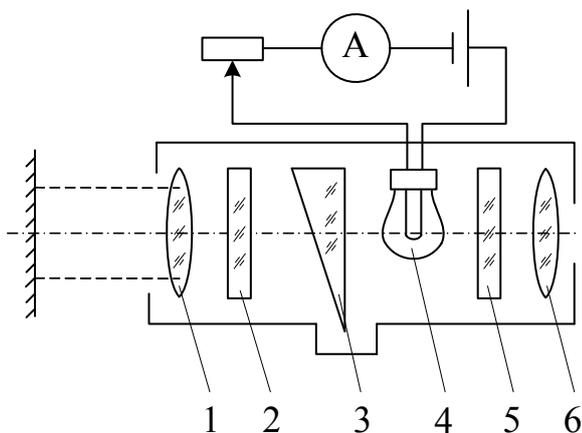


Рис.3. Яркостный пиromетр

Схема радиационного пиromетра приведена на рис.2. Он представляет собой телескоп, внутри которого расположены объектив 1, термопары из последовательно включенных термопар 2, светофильтр 3, окуляр 4. Рабочие концы термопар расположены на платиновом лепестке, покрытом платиновой чернью. При измерении телескоп наводится на объект 5, так, чтобы лепесток полностью перекрывался изображением объекта и вся энергия воспринималась термопарой. Для защиты глаза при наводке телескопа используется светофильтр. Термо-ЭДС термопары является функцией мощности излучения и, следовательно, измерительный прибор можно отградуировать в градусах Цельсия.

Яркостные пиromетры основаны на сравнении в узком участке спектра яркости исследуемого объекта с яркостью образцового излучателя. По спектральным плотностям излучений,

можно определить интересующую нас температуру.

В яркостном пиromетре (рис. 3.) сравнивается яркость исследуемого тела и фотометрической лампы с плоской вольфрамовой нитью. Кроме фотометрической лампы 4 в телескопе расположены объектив 1, нейтральный светофильтр 2 для изменения вдвое пределов измерения, оптический клин 3 для получения линейной зависимости между углом поворота клина и яркостью (яркость нити пропорциональна пятой степени тока накала), окуляр 6 и светофильтр 5, обеспечивающий сравнение интенсивности излучения в узком диапазоне спектра. Яркости сравнивают, наблюдая нить образцового излучателя на фоне исследуемого тела. Если яркость тела больше яркости нити, то нить видна в виде черной линии на ярком фоне, в противном случае заметно

свечение нити на более бледном фоне. При равенстве яркостей нить не видна, поэтому такие пирометры называют пирометрами с исчезающей нитью. Существенным достоинством яркостных пирометров является независимость их показаний от расстояния до излучающей поверхности и ее размеров.

Цветовые пирометры основаны на измерении отношения интенсивностей излучения на двух длинах волн, выбираемых обычно в красной и синей областях спектра. Если коэффициенты неполноты излучения для обеих выбранных длин волн совпадают, то температура, измеряемая цветовыми пирометрами, равна истинной температуре тела. Это одно из решающих преимуществ цветовых пирометров. Кроме того, показания цветовых пирометров принципиально не зависят от расстояния до объекта измерения и от поглощения радиации в среде, заполняющей это расстояние, если коэффициенты поглощения одинаковы для обеих длин волн.

При измерении на двух длинах волн λ_1 и λ_2 соответствующие им значения энергий определяются соотношениями

$$R_{\lambda_1} = \varepsilon_1 C_1 \lambda_1^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda_2 \theta}}; \quad (7)$$

$$R_{\lambda_2} = \varepsilon_2 C_1 \lambda_2^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda_2 \theta}}, \quad (8)$$

откуда искомое значение температуры можно найти из уравнения:

$$\theta = \frac{C_2 \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)}{\ln \left(\frac{R_{\lambda_1} \varepsilon_2 \lambda_2^5}{R_{\lambda_2} \varepsilon_1 \lambda_1^5} \right)}. \quad (9)$$

Поэтому неизменной составной частью любого цветового пирометра является вычислительное устройство.

ПИД-регуляторы

В данном методическом пособии рассматривается классический ПИД-регулятор для одномерных объектов (с одним входом и одним выходом), для медленных (тепловых) процессов.

Простейшая система автоматического регулирования с обратной связью представлена на рис. 4. В ней блок R – регулятор, P – объект регулирования, r – управляющее воздействие (уставка), e – сигнал рассогласования (ошибка), u – выходная величина регулятора, y – регулируемая величина.

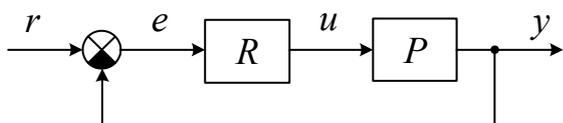


Рис.4. ПИД-регулятор в системе с обратной связью

Если выходная переменная u описывается выражением:

$$u(t) = Ke(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (10)$$

где t – время, а K , T_i , T_d – пропорциональный коэффициент, постоянная интег-

рирования и постоянная дифференцирования соответственно, то такой регулятор называют ПИД-регулятором.

В частном случае пропорциональная, интегральная и дифференциальная компоненты могут отсутствовать, и такие упрощенные регуляторы называют И-, П-, ПД- или ПИ-регуляторами.

Используя преобразование Лапласа при нулевых начальных условиях, передаточную функцию ПИД-регулятора можно представить в операторной форме:

$$R(s) = K + \frac{1}{T_i p} + T_d p = K \left(1 + \frac{1}{KT_i p} + \frac{T_d}{K} p \right), \quad (11)$$

где p – комплексная частота.

Амплитудно-частотная (АЧХ) и фазо-частотная (ФЧХ) характеристики операторной передаточной функции (11) показаны на рис. 5. В области низших частот АЧХ и ФЧХ определяются интегральным членом, в области средних частот – пропорциональным, в области высших – дифференциальным.

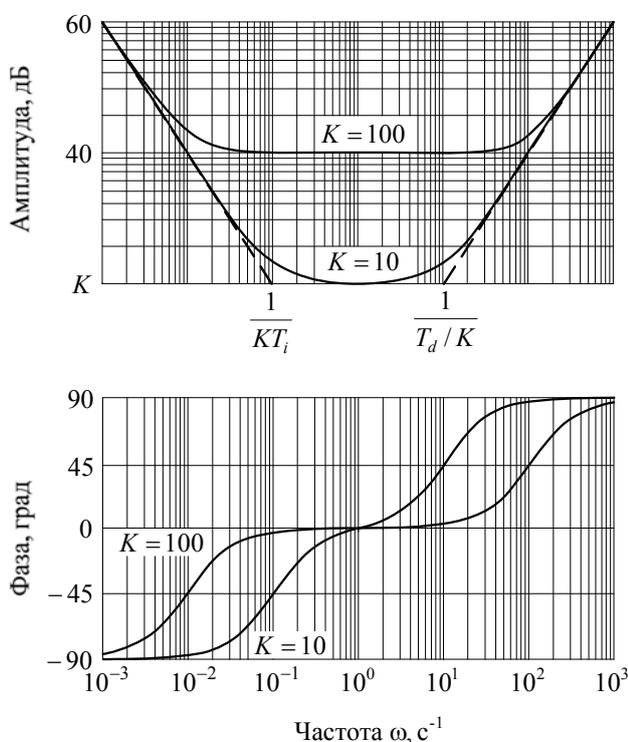


Рис.5. АЧХ и ФЧХ ПИД-регулятора при $T_i=1\text{с}$, $T_d=1\text{с}$, $K=10$ и $K=100$

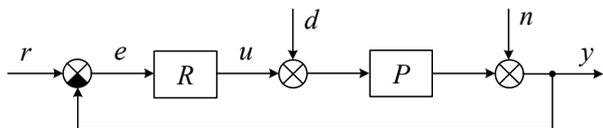


Рис.6. ПИД-регулятор в системе с шумом n и внешними возмущениями d

На систему автоматического регулирования могут воздействовать (рис.6.) внешние возмущения $d=d(p)$ и шум измерений $n=n(p)$.

Внешние возмущения (влияние нагрузки, изменение температуры окружающей среды, ветер, течение воды и т.п.) обычно пространственно распределены по объекту, однако для упрощения анализа их моделируют сосредоточенным источником $d(p)$, приложенным ко входу системы. Источник шума $n(p)$ моделирует погрешность измерений выходной переменной y , погрешность датчика, а также помехи, воздействующие на канал передачи сигнала с выхода системы на её вход.

Вид АЧХ и ФЧХ регулятора определяет его точность и запас устойчивости. С уменьшением интегральной составляющей T_i , как следует из рис.5, увеличивается модуль коэффициента усиления регулятора на низких частотах (то есть при приближении к установившемуся режиму), и поэтому снижается погрешность e .

С увеличением дифференциальной составляющей T_d растёт усиление на высоких частотах, что приводит к усилению шумов измерений и внешних

возмущений. Поэтому дифференциальную составляющую используют только для улучшения формы переходного процесса в системе, а её практическая реализация обычно содержит фильтр высоких частот.

С ростом пропорционального коэффициента K увеличиваются модуль петлевого усиления контура регулирования и точность во всём диапазоне

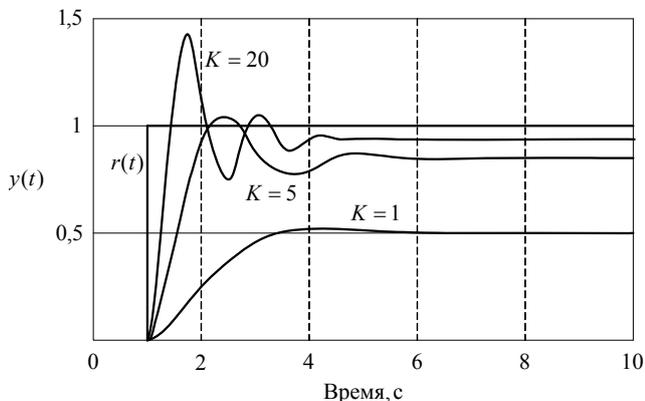


Рис.7. Изменение переменной y во времени при подаче единичного скачка $r(t)$ на вход системы при разных K при $T_i=\infty$, $T_d=0$ (П-регулятор)

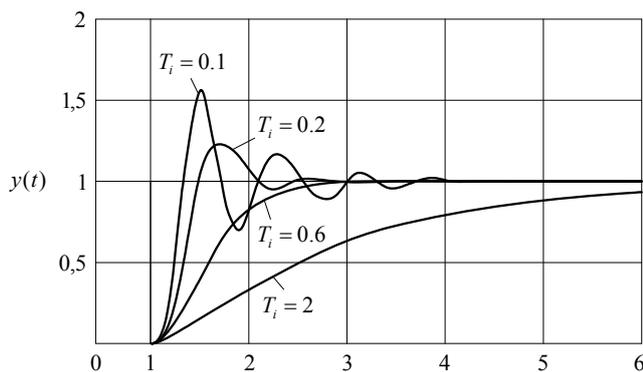


Рис.8. Реакция на скачок $r(t)$ замкнутой системы 2-го порядка (12) при $T=0.1$ с

частот, однако падает запас по фазе и усилению, что ухудшает робастность и качество регулирования системы, а при дальнейшем увеличении K (рис.7) возникают периодические колебания (система теряет устойчивость). Влияние шума и помех измерений n также уменьшается с ростом петлевого усиления и пропорционального коэффициента.

На рис.8. показаны переходные характеристики замкнутой системы с И-регулятором (то есть при $K=0$, $T_d=0$) и объектом второго порядка с передаточной функцией

$$P(p) = \frac{1}{(1+Tp)^2}, \quad (12)$$

где $T=0,1$ с. При больших постоянных интегрирования T_i переходная характеристика имеет вид, сходный с характеристикой апериодического звена. С уменьшением T_i растёт усиление регулятора, и когда на некоторой частоте петлевое усиление контура с обратной связью приближается к 1, в системе появляются колебания.

АЧХ ПИ-регулятора можно получить из рис. 5, если отбросить правую ветвь АЧХ с наклоном $+20$ дБ/дек. При этом сдвиг фаз на частотах выше 1 Гц не превысит уровень 0^0 . Таким образом, ПИ-регулятор имеет два существенных положительных отличия от И-регулятора: во-первых, его усиление на всех частотах не может стать меньше K , следовательно, увеличивается динамическая точность регулирования; во-вторых, по сравнению с И-регулятором, он вносит дополнительный сдвиг фаз только в области низких частот, что увеличивает запас устойчивости замкнутой системы. В то же время, как и в И-регуляторе, модуль коэффициента передачи регулятора с уменьшением частоты стремится к бесконечности, обеспечивая тем самым нулевую ошибку в установившемся режиме. Отсутствие сдвига фаз на высоких частотах позволяет увеличить скорость нарастания управляемой переменной без снижения запаса

устойчивости. Однако это справедливо до тех пор, пока пропорциональный коэффициент K не станет настолько большим, что увеличит усиление контура до единицы на частоте сдвига фаз 180° (ω_{180}).

Переходный процесс в ПИ-регуляторе при разных сочетаниях T_i и K показан на рис.9 и рис.10. При $K=0$ (рис.9) получаем И-регулятор. С ростом пропорционального коэффициента K появляется дополнительная ошибка во

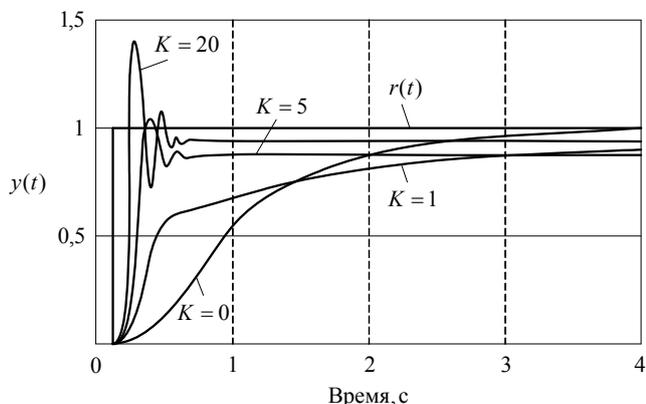


Рис.9. Реакция замкнутой системы с ПИ-регулятором на скачек $r(t)$ при $T_i=0.1$ с

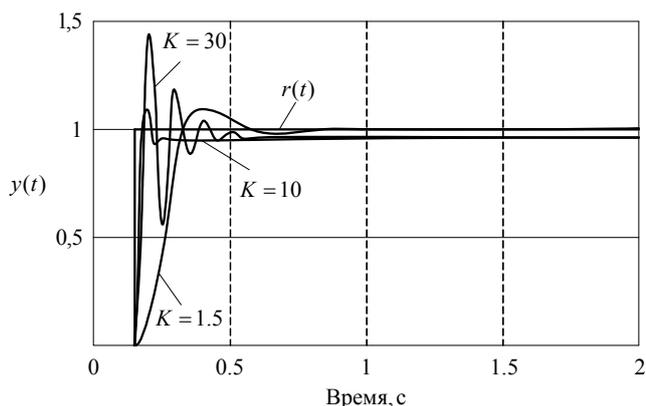


Рис.10. Реакция замкнутой системы с ПИ-регулятором на скачек $r(t)$ при $T_i=0.1$ с для объекта вида (12) при $T=0.1$ с

время переходного процесса (см. также рис.7), которая при дальнейшем увеличении K уменьшается, однако при этом снижается запас устойчивости системы, поскольку с ростом K увеличивается усиление на частоте ω_{180} . Это приводит к появлению затухающих колебаний в начале переходного процесса (рис. 9). Когда величина K становится достаточно большой для компенсации ослабления сигнала в объекте на частоте ω_{180} , в системе появляются незатухающие колебания.

Пропорциональный коэффициент приводит к увеличению времени установления переходного процесса по уровню 0,99 по сравнению с И-регулятором при тех же T_i и T (рис.9): с ростом K уменьшается наклон кривой $y(t)$ при больших t ; в частности, при $t = 4$ с кривая $K=1$ проходит ниже кривой $K=0$, а кривая $K=5$ проходит еще ниже. Объясняется это следующим. Уменьшение ошибки e в ПИ-регуляторе достигается действием одновременно как пропорционального, так и интегрального коэффициентов. Однако пропорциональный коэффициент не может свести ошибку к нулю (рис. 4). Поэтому оставшаяся

ошибка $e(t)$ уменьшается с течением времени при помощи члена $\int_0^t e(t)dt$,

который нарастает тем медленнее, чем меньше $e(t)$. В итоге введение пропорционального коэффициента, уменьшающего $e(t)$, приводит к затягиванию переходного процесса.

В частотной области этот процесс можно объяснить тем, что с ростом K нуль передаточной функции $1/KT_i$, смещается влево (рис. 5), то есть расширяется область частот, где интегральная составляющая пренебрежимо

мала и ПИ-регулятор вырождается в чистый П-регулятор, которому свойственна ошибка в установившемся режиме.

В ПИД-регуляторе присутствует дифференциальный член, который, как следует из рис.5, вносит положительный фазовый сдвиг до 90^0 на частотах выше K/T_d . Это позволяет обеспечить устойчивость или улучшить качество регулирования системы в случаях, когда это невозможно сделать с помощью ПИ-регулятора. На рис. 11 показано влияние постоянной дифференцирования

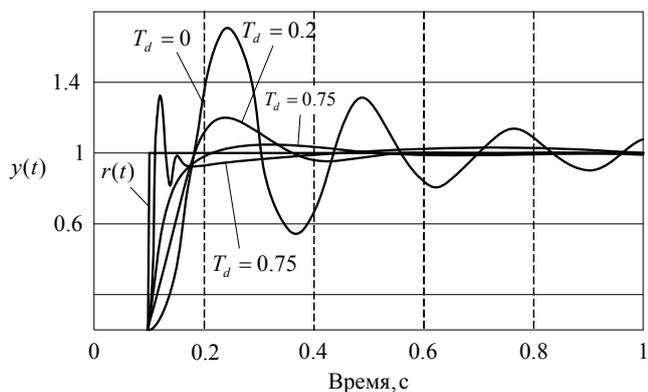


Рис.11. Реакция замкнутой системы с ПИД-регулятором на скачок $r(t)$ при $T_i=0.015$ с, $K=6$ для объекта вида (12) при $T=0.1$ с

на форму отклика замкнутой системы на скачок $r(t)$. Уменьшение амплитуды колебаний и увеличение коэффициента затухания с ростом постоянной дифференцирования T_d объясняется тем, что благодаря положительному наклону АЧХ в области $\omega > K/T_d$ (рис.5) уменьшаются сдвиг фаз в контуре регулирования и петлевое усиление.

Дальнейшее увеличение постоянной дифференцирования приводит к росту усиления ПИД-регулятора на высоких частотах при $\omega > K/T_d$ (рис.5).

Поскольку фазовый сдвиг, связанный с транспортной задержкой, неограниченно увеличивается с ростом частоты, то в системе даже с небольшой транспортной задержкой при увеличении T_d всегда наступает момент, когда петлевое усиление на частоте фазового сдвига 180^0 превысит единицу. При этом на переходной характеристике замкнутой системы сначала появляются затухающие колебания (рис.11, кривая $T_d = 0,75$ с), затем при дальнейшем увеличении T_d система переходит в колебательный режим.

Таким образом, с ростом постоянной дифференцирования запас устойчивости замкнутой системы сначала увеличивается, затем падает.

Описанный в данном разделе ПИД-регулятор и его частные случаи являются теоретическими идеализациями реальных регуляторов, поэтому для их практического воплощения необходимо учесть ограничения, накладываемые реальными условиями применения и технической реализации. Кроме этого, наличие в ПИД-регуляторе всего трех регулируемых параметров в ряде случаев оказывается недостаточным для получения заданного качества регулирования, что привело к появлению множества модификаций ПИД-регуляторов.

Описание лабораторной установки

Схема лабораторной установки показана на рис. 12. О расположении приборов на стенде можно судить по рис. 13. В качестве объектов испытания используются термопреобразователь сопротивления дТС035-50М.В3.160 и измеритель регулятор микропроцессорный ТРМ101 фирмы ОВЕН.

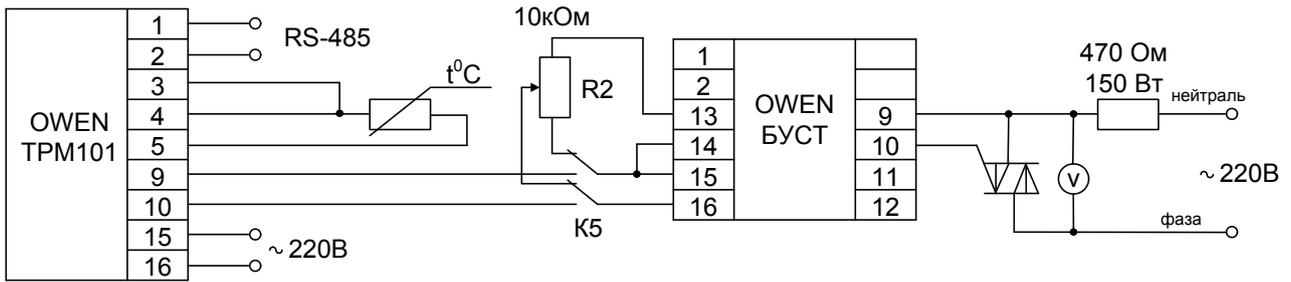


Рис.12. Схема лабораторной установки

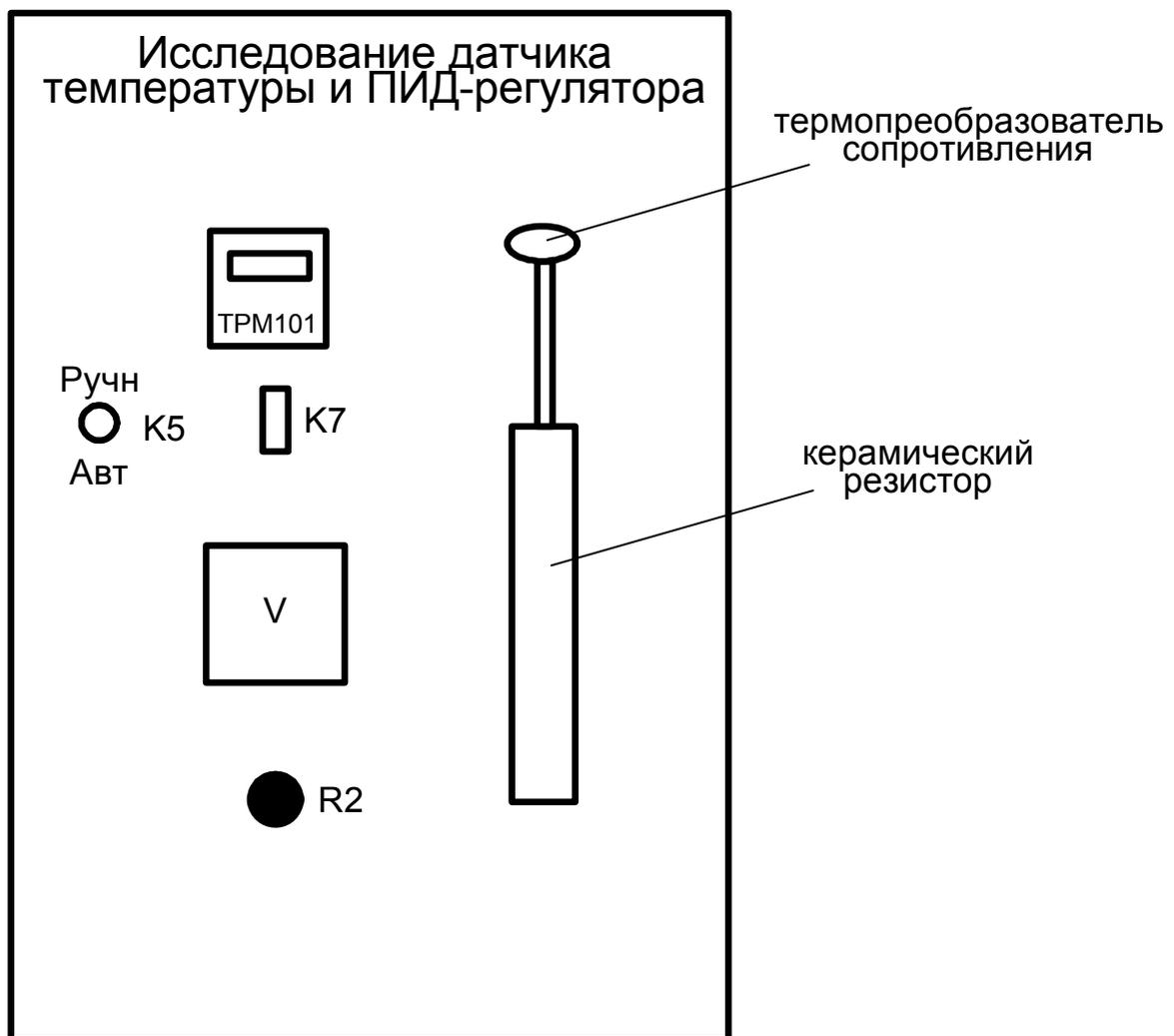


Рис.13. Схема расположения приборов на стенде

Описание измерителя регулятора микропроцессорного ТРМ101

Прибор ТРМ101 в комплекте с первичным преобразователем предназначены для измерения фактического параметра контролируемого объекта, отображения измеренного параметра на встроенном цифровом индикаторе, а также для формирования сигналов управления встроенными выходными устройствами, которые осуществляют регулирование измеряемого параметра.

Прибор может выполнять следующие функции: измерение температуры или другой физической величины; регулирование измеряемой величины по ПИД-закону путем импульсного или аналогового управления; автонастройка ПИД-регулятора на установленном объекте; ручное управление выходной мощностью ПИД-регулятора; самотестирование и автоопределение аварийной ситуации; возможность дистанционного управления ПИД-регулятором по сети с протоколом RS-485.

ПИД регулятор вырабатывает управляющий (выходной) сигнал Y_μ действие которого направлено на уменьшение отклонения E_i :

$$Y_i = \frac{1}{X_p} \left(E_i + \tau_d \frac{\Delta E_i}{\Delta t_{\text{изм}}} + \frac{1}{\tau_i} \sum_{i=1}^n E_i \Delta t_{\text{изм}} \right) \cdot 100\%, \quad (13)$$

Где X_p – полоса пропорциональности;

E_i – разность между заданным $T_{\text{уст}}$ и текущим T_i значением измеряемой величины, или рассогласование;

τ_d – постоянная времени дифференцирования (программируемый параметр «дифференциальная постоянная ПИД-регулятора» - d);

ΔE_i – разность между двумя соседними измерениями E_i и E_{i-1} ;

$\Delta t_{\text{изм}}$ – время между двумя соседними значениями T_i и T_{i-1} ;

τ_i – постоянная времени интегрирования (программируемый параметр «интегральная постоянная времени ПИД-регулятора» - i);

$\sum_{i=1}^n E_i \Delta t_{\text{изм}}$ - накопленная сумма рассогласований.

Из формулы (13) видно, что при ПИД-регулировании сигнал управления зависит от:

1. Разности между текущим значением T_i и заданным значением $T_{\text{уст}}$ измеряемой величины E_p которая реагирует на мгновенную ошибку регулирования; отношение E_i/X_p называется пропорциональной составляющей выходного сигнала;
2. скорости изменения параметра $\Delta E_i/\Delta t_{\text{изм}}$, которая позволяет улучшить качество переходного процесса; выражение $(\tau_d \Delta E_i)/(X_p \Delta t_{\text{изм}})$ называется дифференциальной составляющей выходного сигнала;
3. накопленной ошибки регулирования $\sum_{i=1}^n E_i \Delta t_{\text{изм}}$, которая позволяет добиться максимально быстрого достижения температуры уставки;

выражение $\frac{1}{X_p \tau_i} \sum_{i=1}^n E_i \Delta t_{\text{изм}}$ называется интегральной составляющей выходного сигнала.

Для эффективной работы ПИД-регулятора необходимо установить правильные для конкретного объекта регулирования значения коэффициентов X_p , τ_d и τ_i , которые определяются автоматически в режиме АВТОНАСТРОЙКА или ввести при помощи ручной настройки.

Программирование прибора.

Основные параметры прибора ТРМ101 разделены на 5 групп, составляющих меню прибора. Переход между заголовками групп меню и групп и членов меню осуществляется согласно рис.14.

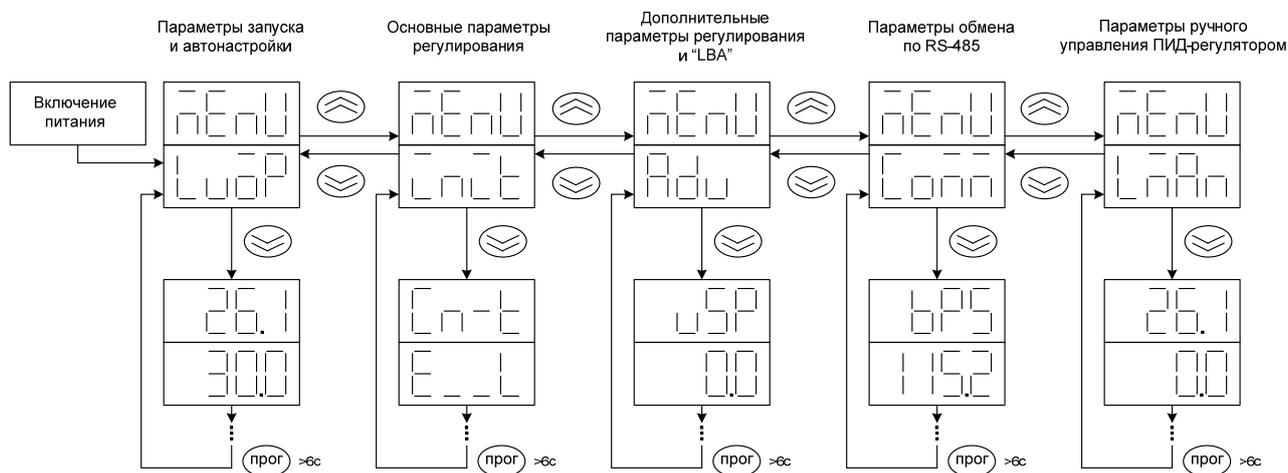


Рис.14. Порядок перехода между программируемыми параметрами

Переход между заголовками групп меню осуществляется кнопками \leftarrow (к следующему) и \rightarrow (к предыдущему). Переход к первому параметру каждой группы осуществляется кратким нажатием кнопки прог , а возврат в заголовки группы (из любого параметров группы) – длительным ($\geq 6\text{с}$) нажатием кнопки прог .

Программируемые параметры прибора ТРМ101 приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Обозначение	Название	Допустимые значения	Комментарии	Заводская уставка
1	2	3	4	5
Группа L_{uOP} . Параметры регулирования				
P_u	Измеренная величина	Диапазон измерения датчика	Параметр не устанавливаемый и индуцируемый	
SP	Уставка регулятора*	Определяется параметрами $SL-L$ и $SL-H$	На индикаторе обозначение параметра не отображается	30.0
$r-s$	Запуск/остановка автонастройки	rUn $sSTOP$	Регулятор работает Регулятор остановлен, на выходное устройство выдается сигнал, равный значению, установленному в параметре $odSt$ или $onSt$	$sSTOP$
At	Запуск/остановка автонастройки	rUn $sSTOP$	Не появляется при $r-s = sSTOP$ Запускается режим автонастройки Автонастройка выключена	$sSTOP$
\bar{O}	Выходная мощность ПИД-регулятора	0.0...100.0	[%] Параметр не устанавливаемый, и индуцируемый	-
Группа L_{nCL} . Основные параметры настройки				
$CL-t$	Тип датчика			E_{LL}
dPt	Точность вывода температуры	0; 1	Задается число знаков после запятой при отображении температуры на индикаторе	1
dP	Положение десятичной точки	0; 1; 2; 3	Задаёт число знаков после запятой при отображении на индикаторе измеренного значения	1
$CL-L$	Нижняя граница диапазона измерения*	- 1999...9999	Задаёт значение физической величины соответствующей нижнему пределу выходного сигнала датчика	0.0
$CL-H$	Верхняя граница диапазона измерения*	- 1999...9999	Задаёт значение физической величины соответствующей верхнему пределу выходного сигнала датчика	0.0
$SL-L$	Нижняя граница задания уставки*	От нижней до верхней границы диапазона измерения датчика	[ед.изм]	-199.9
$SL-H$	Верхняя граница задания уставки*	От нижней до верхней границы диапазона измерения датчика	[ед.изм]	800.0
SH	Сдвиг характеристики датчика*	-500...+500	Прибавляется к измеренному значению, [ед.изм]	0.0
PU	Наклон характеристики датчика	0.50...2.00	Умножается на измеренное значение	1.000
Fb	Полоса цифрового фильтра*	0...9999	[ед.изм]	0.0
CLF	Постоянная времени цифрового фильтра	0.999	[с]	0
$OR-EU$	Тип управления при регулировании	$OR-d$	«Прямое» управление. Выходной сигнал увеличивается при увеличении измеряемого значения. Применяется	$OR-r$

		01...250	для управления «холодильником». «Обратное» управление. Выходной сигнал уменьшается при увеличении измеряемого значения. Применяется для управления «нагревателем».	
EP	Период следования управляющих импульсов	01...250	[с]	1
Группа P ₀₀ . Дополнительные параметры настройки прибора.				
cntrl	Режим регулирования	PID onoff	ПИД-регулятор Двухпозиционный регулятор	PID
rapid	Режим быстрого выхода на уставку	on off	ВКЛ ВЫКЛ	off
P	Полоса пропорциональности ПИД-регулятора*/**	0.001...999 9	[ед.изм]	30.0
I	Интегральная постоянная ПИД-регулятора**	0...3999	[с]	100
D	Дифференциальная постоянная ПИД-регулятора**	0...3999	[с]	20
db	Хона нечувствительности ПИД-регулятора**	0...200	[ед.изм]	0.0
ol-l	Минимальная выходная мощность (нижний предел)**	От 0 до ol-h	[%]	0
ol-h	Максимальная выходная мощность (верхний предел)**	От ol-l до до 100	[%]	100
oql	Максимальная скорость изменения выходной мощности**	0.2...100.0	[%/с]	100
Группа Co ₀₀ . Параметры обмена по интерфейсу RS-485				
bps	Скорость обмена данными в сети	2.4 4.8 115.2	[кбит/с] Должна соответствовать скорости обмена данными, установленной в сети	115.2
alen	Длина сетевого адреса	8 11	[бит]	8b
addr	Базовый адрес прибора в сети	0...2047	Запрещается устанавливать одинаковые номера нескольким приборам в одной шине	0
rsdl	Задержка ответов по сети	1...45	[мс]	20
Группа L ₀₀₀ . Параметры ручного управления ПИД-регулятором				
o-ed	Выходной сигнал ПИД-регулятора	Определяется параметрами ol-l и ol-h	[%]	0.0
- o	Текущее значение выходной мощности ПИД-регулятора	0.0...100.0	[%] Не устанавливается, а индуцируется	-

* - Параметры отображаются с десятичной точкой, положение которой определяется dP;

** - Параметры отображаются при cntrl = PID

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с данными методическими указаниями и лабораторным стендом;
2. Подготовить протокол для записи показателей опытов;
3. Повернуть ручку резистора R2 до конца против часовой стрелки;
4. Установить автомат K0 в положение «ВКЛ». подать питание на схемы выключателя K7;
5. Установить положение K5 в положение «РУЧН»;
6. Снять характеристику $t_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$;
7. Повернуть ручку резистора R2 до конца против часовой стрелки;
8. Дождаться остывания керамического резистора;
9. Запрограммировать параметры ПИД-регулирования (полоса пропорциональная, дифференциальная и интегральная постоянная времени, полоса и постоянная времени цифрового фильтра) определенные при помощи АВТОНАСТРОЙКИ;
10. Снять характеристику переходного процесса;
11. Изменяя параметры ПИД-регулирования снять несколько характеристик (не переходить к новому опыту до полного остывания керамического резистора).

Отчет по работе

1. Цель работы;
2. Задание на работу;
3. Схема установки
4. Протокол наблюдений;
5. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Какие преобразователи называются тепловыми?
2. Термоэлектрические преобразователи.
3. На чем основан принцип действия терморезистивных преобразователей?
4. Какие материалы применяются для производства терморезистивных преобразователей?
5. Преимущества и недостатки различных терморезистивных преобразователей?
6. Пирометры.
7. Какое влияние оказывают изменения параметров ПИД-регулятора на систему в целом?