

Проект «Инженерные кадры Зауралья»

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Курганский государственный университет»

*Кафедра автоматизации производственных процессов*

**Моделирование тепловых процессов в автоматизированных  
технологических системах**

Методические указания  
к выполнению лабораторных работ  
по дисциплинам «Моделирование систем и процессов»  
для студентов очной и заочной форм обучения  
специальности 220301 «Автоматизация технологических процессов и  
производств (в машиностроении)»

Курган 2013

Кафедра автоматизации производственных процессов

Дисциплина: «Моделирование систем процессов»

Составили: доцент, канд. техн. наук Лебединский Б.П.,  
инженер Постных В.Н.

Утверждены на заседании кафедры

«14» ноября 2013 г.

Рекомендованы методическим советом университета в рамках проекта  
«Инженерные кадры Зауралья» «22» ноября 2013 г.

## Введение

В современном автоматизированном производстве широкое применение находят электрические печи и печи с газовым нагревом различного типа: шахтные, камерные, карусельные, конвейерные и др. Выпускаются также автоматические линии термообработки, где все технологические операции выполняются в едином комплексе. В печах и автоматизированных линиях осуществляется плавка цветных металлов, нагрев деталей перед ковкой и штамповкой, цементация и азотирование, закалка и др. Существуют также печи для отпуска и снятия послесварочных напряжений, отжига. Указанные выше технологические процессы могут осуществляться также в безокислительной атмосфере, например в среде инертного газа или вакуумных печах.

Современные микропроцессорные регуляторы температуры (контроллеры) производят управление технологическим процессом, причем это могут быть как простые регуляторы с функцией только поддержания температуры, так и программные, обеспечивающие проведение термического процесса по заданной температурно-временной характеристике. Регулирование мощности нагрева осуществляется через тиристорные преобразователи мощности. Для печей различного назначения величина мощности лежит в пределах (5...660 кВт), а температурный режим в пределах (200...1200°C)

При управлении технологическим объектом (процессом), управляющее устройство должно располагать информацией о его свойствах и состоянии в данный момент времени. Это обеспечивается введением в управляющее устройство априорной и текущей информации, объем которой зависит от сложности и задач, выполняемых системой управления.

Любой технологический объект (процесс) может быть рассмотрен как система, имеющая определенное число входов и выходов. Управляющее устройство вырабатывает воздействия на входы объекта, так, чтобы технологические параметры, для обеспечения требуемого качества выпускаемой продукции, принимали заданное или оптимальное значение и не превышали предельно допустимых значений. Это значит, что управляющие воздействия и их последовательность должны формироваться управляющим устройством с учетом особенностей объекта управления т.е. учитывая его статистические и динамические характеристики.

Таким образом, для высококачественного управления технологическим объектом, необходимо изучить связи (закономерности) существующие между его входными (задающими) и выходными (управляемыми) величинами. Математическая связь существующая между входными и выходными величинами, представленная формализовано, носит название **модели или алгоритма функционирования объекта**. Без такой модели объекта невозможна разработка целенаправленного управления им. Чем универсальнее, точнее модель технологического объекта (процесса), тем эффективнее и результативнее можно осуществлять управление.

# Лабораторная работа №1

## Определение статических и динамических характеристик объекта регулирования – нагревательной печи.

**Цель работы:** Определить передаточную функцию нагревательной печи по её переходной характеристике. Оценить точность определения параметров.

Математическое описание объекта может быть получено либо аналитически, либо экспериментальными методами. В первом случае анализ физических, тепловых и иных процессов происходящих в объекте приводит к дифференциальным, интегро-дифференциальным, разностным и т.д. уравнениям, связывающим входные и выходные переменные. При этом приходится принимать упрощающие предположения, что снижает достоверность полученной модели.

Экспериментальные методы базируются на пассивном либо активном эксперименте. Метод пассивного эксперимента основан на регистрации контролируемых параметров процесса в режиме нормальной работы объекта без внесения в него каких-либо преднамеренных возмущений. Метод активного эксперимента основан на использовании определенных искусственных возмущений, вводимых в объект по заранее спланированной программе. Наиболее часто используют определение математического описания (передаточной функции) объекта по его переходной характеристике.

Рассмотрим переходную характеристику  $h(t)$  изображенную на рисунке 1. Характеристики подобного вида часто называют S-образными.

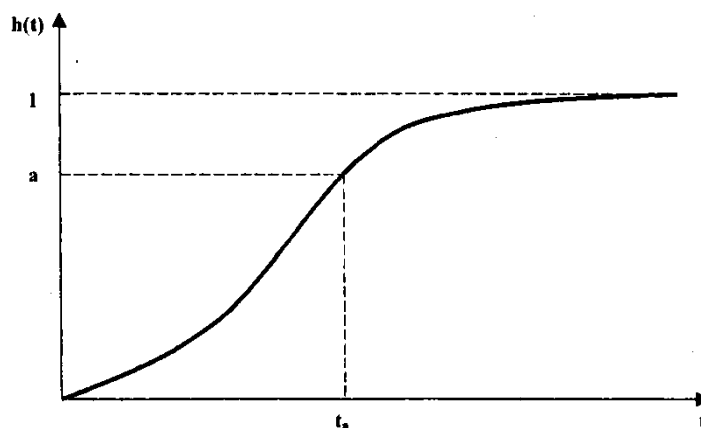


Рисунок 1. Переходная характеристика объекта

Объект с такой характеристикой можно представить в виде нескольких последовательно соединенных апериодических звеньев первого порядка. При подборе математического выражения, соответствующего S-образной переходной характеристике, предположим, что рассматриваемый объект может быть представлен последовательно соединенными апериодическими звеньями первого порядка

$$W_{об}(P) = \frac{K_{об}}{(Tp + 1)^m} \quad (1)$$

где  $T$  – постоянная времени;  $m=1,2 \dots$  - число апериодических звеньев

Переходная характеристика объекта  $h(t)$  определяется обратным преобразованием Лапласа

$$h(t) = L^{-1} \left[ \frac{W_{об}(P)}{P} \right] \quad (2)$$

В передаточной функции (2) имеется один нулевой полюс и полюс  $P = -\frac{1}{T}$  кратностью  $m$ . В соответствии с методом определения временной функции  $h(t)$  при кратных полюсах [4] будем иметь

$$h(t) = 1 - e^{-t/T} \sum_{\lambda=1}^m \frac{\lambda t^{\lambda-1}}{\lambda! T^{\lambda-1}} \quad (3)$$

Если ввести относительную переменную  $T^* = T/t$ , то уравнение (3) запишется в виде

$$h(t) = 1 - e^{-1/T^*} \sum_{\lambda=1}^m \frac{1}{(\lambda-1)!} \left( \frac{1}{T^*} \right)^{\lambda-1} \quad (4)$$

В этом уравнении при принятом  $m$  имеется только одна переменная  $T^*$ .

Переходная характеристика при  $t = t_a$  (рисунок 1) будет иметь значение  $h(t_a) = a$ . Из уравнения (4) можно определить  $T_a^* = T/t_a$  и искомую постоянную времени

$$T = T_a^* t_a \quad (5).$$

Если объект управления содержит звено чистого запаздывания

$$W_{об}(p) = \frac{K_{об} e^{-\tau_0 p}}{(Tp + 1)^m} \quad (6)$$

где  $\tau_0$  - время запаздывания, то переходная характеристика будет иметь вид, приведенный на рисунке 2.

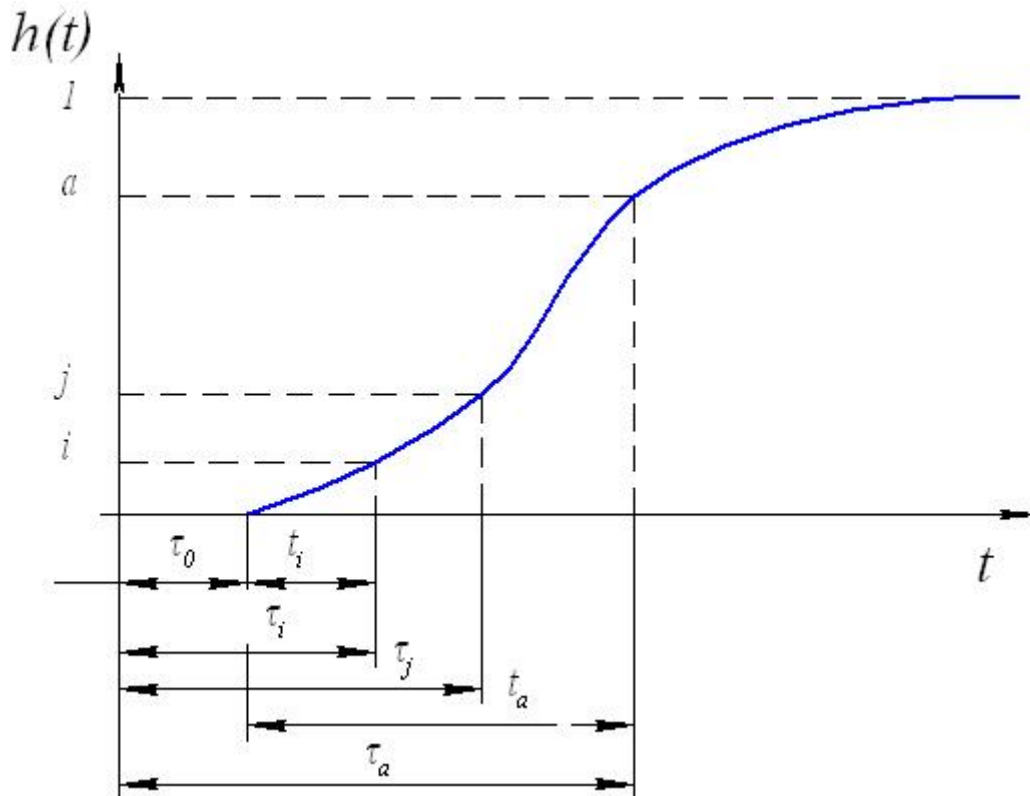


Рисунок 2. Переходная характеристика объекта при наличии времени чистого запаздывания

При экспериментальном определении переходной характеристики объекта из-за помех существующих в производственных условиях, непосредственное определение  $\tau_0$  может привести к большим неточностям. Поэтому в [4] предлагается использовать дополнительную точку  $(i, t_i)$  для определения  $\tau_0$ .

Определим  $h(t)$  при конкретных значениях  $t$  в соответствии с обозначениями, принятыми на рисунке 2.

$$\begin{aligned}
t = t_a & \quad T_a^* = T/t_a & \quad h(t_a) = a \\
t = t_i & \quad T_i^* = T/t_i & \quad h(t_i) = i
\end{aligned}
\tag{7}$$

Если задаться значениями  $a$  и  $i$ , то при выбранном  $m$  можно, используя выражение (4), рассчитать относительные постоянные времени  $T_a^*$  и  $T_i^*$ . Это позволяет для любого  $m$  определить относительное значение

$$t_{ia}^* = \frac{t_i}{t_a} = \frac{T_a^*}{T_i^*} \tag{8}$$

Если объект имеет время чистого запаздывания  $\tau_0$ , то с учетом обозначений, принятых на рисунке 2, получим

$$t_{ia}^* = \frac{\tau_i - \tau_0}{\tau_a - \tau_0} = \frac{T_a^*}{T_i^*}$$

Откуда:

$$\tau_0 = A_{ia}(B_{ia}\tau_i - \tau_a) \tag{9}$$

где  $A_{ia} = T_a^*/(T_i^* - T_a^*) \tag{10}$

$$B_{ia} = T_i^*/T_a^* \tag{11}$$

В (10) и (11)  $A_{ia}$  и  $B_{ia}$  - постоянные величины для каждого сочетания значений  $m$ ,  $a$ ,  $i$ . Таким образом, определив значение  $\tau_a$  и  $\tau_i$  из экспериментальной переходной характеристики по выражению (9) при принятом  $m$ , можно найти время чистого запаздывания  $\tau_0$ , а затем с учетом (5) и постоянную времени

$$T = T_a^*(\tau_a - \tau_0) \tag{12}$$

Для удобства использования приведенной выше методики экспериментального определения передаточной функции объекта, в [4] приведена таблица значений постоянных  $T_a^*$ ,  $A_{ia}$  и  $B_{ia}$  для  $a=0,7$  и  $i=0,1; 0,2; 0,3; 0,4$  в зависимости от степени  $m$  аппроксимирующей передаточной функции.



Таблица 1.

Значения постоянных  $T_a^*$ ,  $A_{ia}$  и  $B_{ia}$ , для  $a = 0,7$  и  $i = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4$  в зависимости от степени  $m$  аппроксимирующей передаточной функции

$m$	$T_7^*$	$A_{17}$	$B_{17}$	$A_{27}$	$B_{27}$	$A_{37}$	$B_{37}$	$A_{47}$	$B_{47}$
1	0,831	0,096	11,42	0,228	5,392	0,421	3,375	0,737	2,357
2	0,410	0,279	4,586	0,511	2,959	0,818	2,223	1,295	1,772
3	0,277	0,439	3,279	0,738	2,355	1,125	1,889	1,719	1,582
4	0,210	0,578	2,729	0,932	2,073	1,383	1,723	2,071	1,483
5	0,170	0,676	2,421	1,103	1,906	1,610	1,621	2,380	1,420
6	0,143	0,818	2,223	1,257	1,795	1,815	1,551	2,165	1,376
7	0,123	0,924	2,083	1,401	1,714	2,004	1,499	2,915	1,343
8	1,109	1,025	1,976	1,540	1,649	2,186	1,458	3,165	1,306
9	0,097	1,116	1,896	1,667	1,602	2,343	1,427	3,376	1,296
10	0,088	1,204	1,830	1,777	1,563	2,499	1,400	3,587	1,279
11	0,080	1,289	1,777	1,882	1,529	2,648	1,378	3,778	1,264
12	0,074	1,369	1,731	2,000	1,500	2,778	1,359	3,977	1,251
13	0,068	1,446	1,691	2,105	1,475	2,922	1,342	4,159	1,240
14	0,064	1,521	1,658	2,204	1,454	3,053	1,328	4,337	1,231
15	0,060	1,593	1,628	2,292	1,436	3,180	1,315	4,509	1,222

Для упрощения записи в индексах при величинах, относящихся к конкретным точкам переходной характеристики, указаны цифры, равные числу после запятой, и соответствующие координаты данной точки. Например, в таблице 1 величины  $A_{ia} = A_{17}$  и  $B_{ia} = B_{17}$  соответствуют точке с координатами ( $i=0,1; a=0,7$ ). Величина  $T_a^* = T_7^*$  является относительной постоянной времени при базовом значении  $t_a = t_7$  точки с коэффициентами ( $a=0,7; t_a$ ) и т.д.

Вычисление постоянных  $T_a^*$ ,  $A_{ia}$ ,  $B_{ia}$ , внесенных в таблицу 1, осуществлялось по уравнению (4) с учетом чистого запаздывания для различных  $m$ .

Существует методика упрощенного определения передаточной функции объекта по его переходной характеристике (рисунок 3)

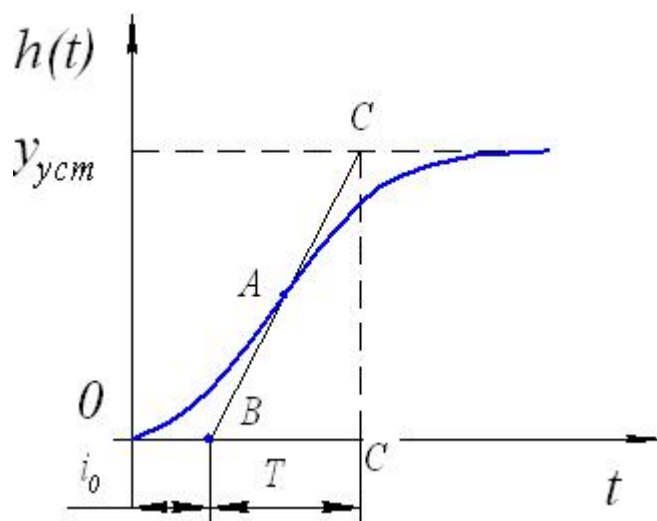


Рисунок 3 График для определения параметров передаточной функции объекта

Если в точке максимальной скорости изменения выходной величины (точка А) провести касательную к кривой переходной характеристики и продолжить её до пересечения с линией начального значения выходной величины (точка В), то отрезок времени от момента внесения входного воздействия до точки пересечения касательной с осью (отрезок ОВ) определит запаздывание объекта  $\tau_0$ . Отрезок времени ВС' определяет постоянную времени объекта – Т. Постоянная времени – это изменение выходной величины от начального до установленного значения, если бы это изменение происходило со скоростью постоянной и максимальной для данного переходного процесса.

Таким образом тепловой объект в рассматриваемой методике представляется последовательным соединением инерционного звена чистого запаздывания. Передаточная функция имеет вид

$$W'_{\text{экс}}(p) = \frac{K_{\text{об}} \cdot e^{-\tau_0 p}}{Tp + 1} \quad (13)$$

где  $K_{\text{об}} = \frac{y_{\text{уст}}}{x_{\text{уст}}}$  - коэффициент передачи объекта (нагревательной печи) в установившемся режиме.

## Порядок выполнения лабораторной работы

1. Для заданного преподавателем варианта вызвать модель объекта, передаточную функцию которого требуется определить. Модель реализована в программном продукте ViSible Simulation (VisSim).

2. Определить коэффициент передачи объекта. Для этого на вход подать единичное воздействие  $x(t)=1(t)$  и определить установившееся значение выходной величины –  $y_{уст}$ . Коэффициент передачи объекта:

$$K_{об} = y_{уст}/x_{уст}$$

где  $x_{уст} = 1$ .

3. Задать величину входного воздействия такой, чтобы установившееся значение выходной величины было равно 1. При этом условии можно использовать ранее приведенные формулы.

4. Определить передаточную функцию объекта по его переходной характеристике используя аппроксимирующие точки.

4.1. Принять  $a=0,7$   $i=0,1$ . Используя систему определения координат, определить  $\tau_i$  и  $\tau_7$ . Для этого навести указатель на поле блока Plot. Правой кнопкой вызвать параметры этого блока и нажать кнопку “определение координат”.

4.2. Задаться  $m=2$  и по таблице 1 найти  $T_7^*$ ,  $A_{17}$ ,  $B_{17}$ . По формулам (9), (12) определить  $\tau_0$  и  $T$ . Повторить расчет при  $m = 3, 4$  и  $5$ .

4.3. Повторить пункт 4.2 задавшись одним из других значений  $i=0,2$  или  $0,3$  или  $0,4$ .

5. Определить передаточную функцию объекта по трем аппроксимирующим точкам. При этом она должна совпадать с экспериментальной в 2-х точках, например  $(\tau_i, i)$  и  $(\tau_a, a)$  и проходить как можно ближе к третьей точке  $(\tau_j, j)$ . Параметр  $m$  принимается таким, чтобы отклонение от точки  $(\tau_j, j)$  было минимальным.

5.1. Принять  $a=0,7$ ;  $i=0,2$ ;  $j=0,1$

Определить  $\tau_7$ ;  $\tau_2$ ;  $\tau_1$

5.2. Определить  $\tau_0$  по выражению (9) для различных значений  $m$  и занести в таблицу 2.

Таблица 2 Определение величины  $m$

$m$	$\tau_0 = f(\tau_1; \tau_7)$	$\tau_0 = f(\tau_2; \tau_7)$	$\Delta\tau_0 = f(\tau_1; \tau_7) - f(\tau_2; \tau_7)$
2			
3			
4			
5			

Записать экспериментально определенную передаточную функцию теплового объекта  $W''_{\text{экс}}(p)$ , приняв такое значение  $m$ , при котором  $\Delta\tau_0$  будет минимальным (по абсолютной величине). Для этого значения  $m$  принять ранее определенные  $T$  и  $\tau_0$ .

5.3. Повторить пункт 5.2 задавшись другим значением  $j$  (0,3 или 0,4)

6. «Раскрыть» модель объекта, параметры которого определялись при проведении эксперимента. Определить  $m$ ,  $T$  и  $\tau_0$ , которые были заложены в модели и сравнить их с экспериментально определенными значениями.

7. Оценить точность экспериментального определения параметров передаточной функции, вычислив относительную погрешность в % определения  $T$  и  $\tau_0$ .

8. Определить параметры передаточной функции  $W'_{\text{экс}}(p)$ .

9. Сформировать  $W_{\text{экс}}(p)$  и  $W'_{\text{экс}}(p)$ , используя блок «Передаточная функция» из раздела «Линейные системы». Входное единичное воздействие подать на вход  $W_{\text{экс}}(p)$  и  $W'_{\text{экс}}(p)$ , а выходные сигналы – на «Plot».

Сравнить переходные процессы модели объекта, заложенного в задании и полученные в результате экспериментального определения. Сделать соответствующие выводы.

### Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Привести переходную характеристику с координатами аппроксимирующих точек.
3. Привести результаты экспериментального определения параметров модели и точность их определения (п.4, п.5, п.6, п.7).
4. Привести графики пункта 9.
5. Сделать выводы о проделанной работе.

### **Контрольные вопросы.**

1. Поясните с каким процессом связана постоянная времени звена чистого запаздывания -  $\tau_0$ ?
2. Почему в п. 4.2 задается  $m = 2$ , а величина  $m = 1$  не используется?
3. Какая «тепловая модель» определяет вид переходной характеристики, получаемой в лабораторной работе?
4. Объясните как изменится вид переходной характеристики, если в печь загружена партия деталей?

## Лабораторная работа №2

### Исследование замкнутой системы автоматического регулирования температуры нагревательной печи с различными типами регуляторов.

**Цель работы:** Изучить основные алгоритмы функционирования регуляторов и их динамические характеристики. Освоить методы расчета параметров регуляторов. Исследовать переходные процессы изменения температуры нагревательной печи замкнутых САУ с различными типами регуляторов (П, ПИ, ПИД).

Для повышения точности регулирования температуры нагревательной печи и улучшения динамических характеристик по управляющему и возмущающему воздействиям используют одноконтурную систему автоматического регулирования (САУ).

Структурная схема САУ имеет вид

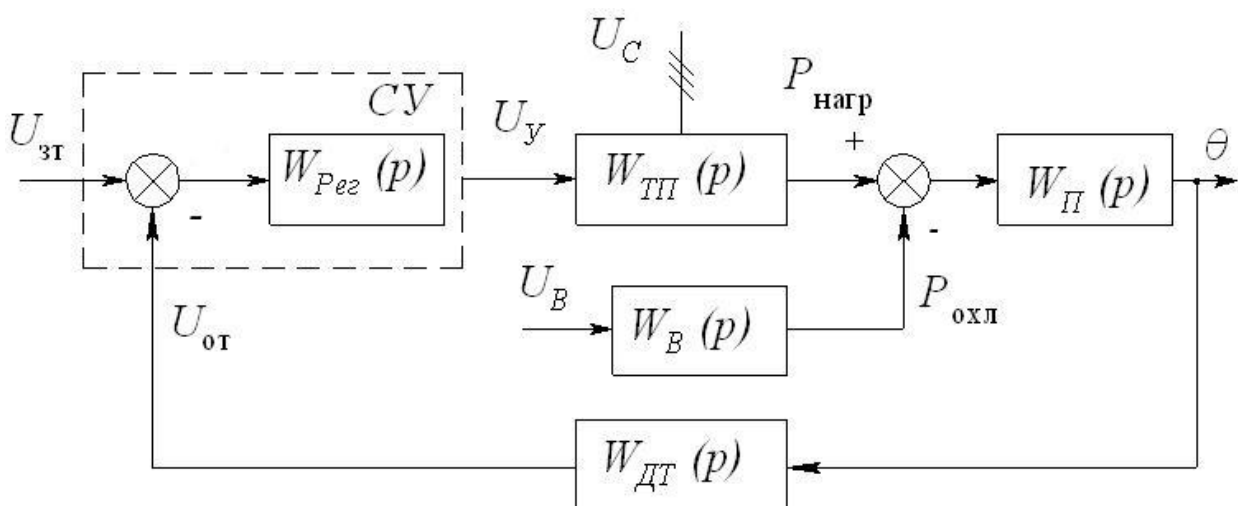


Рисунок 4. Структурная схема САУ температурой печи

Пунктиром на рисунке 4 изображена система управления (микропроцессорный контроллер), в которой реализуется ПИД закон регулирования. Для управления тепловыми объектами широко используются контроллеры МИКРОДАТ, OMRON, SIEMENS и др. Кроме поддержания температуры программное обеспечение контроллера обеспечивает выполнение следующих функций:

1. Прием отображения и накопление данных текущего термического процесса.
2. Временная привязка данных (дата, время).
3. Отображение данных ранее прошедших процессов.
4. Предоставление данных в табличном или графическом виде, вывод на печать.

В качестве датчика температуры используют термопару, термо э.д.с. которой пропорциональна температуре в печи (или в месте расположения нагреваемых деталей). Учтем небольшую инерционность термопары помещенной в защитный корпус. Тогда передаточная функция датчика температуры будет иметь вид

$$W_{\text{ДТ}}(p) = \frac{K_{\text{ДТ}}}{T_{\text{ДТ}}p + 1}$$

Примем:

1.  $\theta_{\text{уст}} = 800^{\circ}\text{C}$  - установившееся значение температуры, соответствующее температуре технологического процесса для данной марки стали;
2.  $U_{\text{ЗТ}} = 10\text{В}$  – напряжение задание температуры;
3.  $T_{\text{ДТ}} = 1,5\text{ с}$ .

Тогда  $K_{\text{ДТ}} = \frac{10}{\theta_{\text{уст}}} = \frac{10}{800} = 0,0125 \frac{\text{В}}{^{\circ}\text{C}}$

Передаточная функция ПИД регулятора имеет вид

$$W_{\text{рег}}(p) = K_p + \frac{K_I}{p} + \frac{K_D p}{T_D p + 1} \quad (14)$$

где  $K_p$  - коэффициент передачи пропорциональной части регулятора;

$K_I$  - интегратора;

$K_D$  - дифференцирующей части регулятора;

$T_D$ - постоянная времени, которая характеризует инерционность дифференцирующего звена (реальное дифференцирующее звено).

$W_{\text{ТП}}(p)$  – передаточная функция тиристорного преобразователя работающего в режиме ШИМ, через который под действием сигнала управления  $U_y$  электрическая мощность питающей сети поступает на нагревательный элемент печи -  $P_{\text{нагр}}$ .

Инерционность тиристорного преобразователя мала и поэтому можно считать,  $W_{ТП}(p) = K_{ТП}$ .

Возмущающее воздействие  $U_B$  через передаточную функцию  $W_B(p)$  приложено ко входу нагревательной печи и определяет снижение в ней температуры при разгрузке-загрузке. Это воздействие эквивалентно приложению охлаждающей мощности -  $P_{охл}$ .

Рассмотрим работу нагревательной печи при приложении возмущающего воздействия. После нагрева и определенной временной выдержки печь открывается (момент времени  $t_1$  рисунок 5) и производится разгрузка нагретых деталей и загрузка следующей партии деталей. При этом в зависимости от площади дверей и массы, материала, а также объема деталей и температуры окружающей среды происходит снижение температуры в печи. С окончанием процесса загрузки и закрытием дверей температура в печи повышается (рисунок 5).

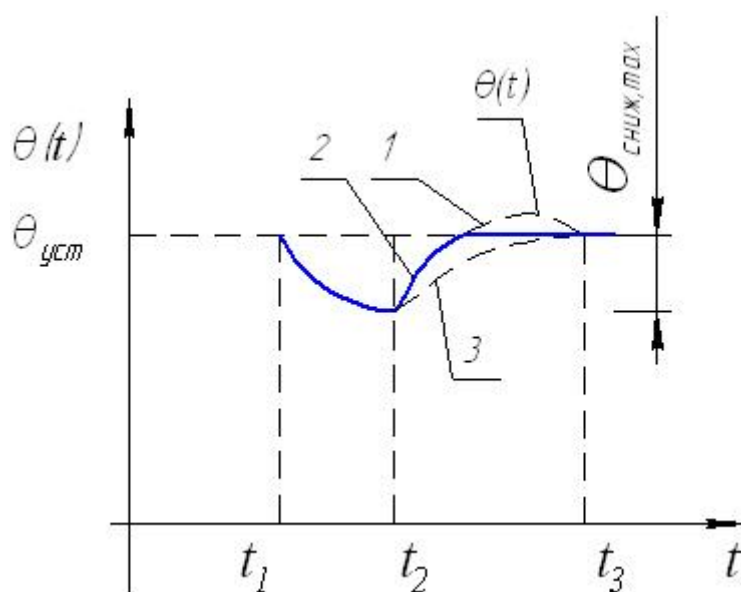


Рисунок 5. Изменение температуры печи при её перезагрузке

Характер изменения температуры в печи на участке  $t_1 \dots t_3$  можно определить экспериментально для конкретной нагревательной печи и используемого технологического процесса. Участок  $t_1 \dots t_2$  соответствует времени разгрузки – загрузки деталей, а  $t_2 \dots t_3$  - времени восстановления температуры в печи. Для описания указанного процесса будем использовать



инерционное звено  $W_B(p) = \frac{K_B}{T_B p + 1}$ , поскольку теплоотдача в окружающую среду происходит медленнее, чем нагрев. Теплоотдача происходит через площадь двери и объемно через нагрев деталей, помещенных в печь, а восстановление температуры – за счет объемного нагрева пространства печи.

Для каждого варианта студенту задаются значения  $K_B$  и  $T_B$ , характеризующие величину возмущающего воздействия.

Величина  $\theta_{\text{сниж, max}}$  (рисунок 5), а также различный вид (1, 2, 3) зависимости  $\theta(t)$  будет характеризовать работу системы управления, т.е. настройку ПИД-регулятора.

Рассмотрим используемые методы настройки ПИД-регулятора.

### 1. Настройка ПИД-регулятора по методике Циглера-Никольса [4] и конструкторского бюро «АГАВА» [6].

Настройка ПИД-регулятора состоит из следующих этапов:

1.1 ПИД-регулятор переводят в режим П-регулятора, т.е. задают

$$K_I = 0; K_D = 0$$

1.2 Контур регулирования выводят на границу устойчивости, увеличивая коэффициент передачи пропорциональной части регулятора  $K_p \rightarrow K_{p \text{ крит}}$ , где  $K_{p \text{ крит}}$  - значение коэффициента, при котором в системе возникают незатухающие колебания (рисунок 6).

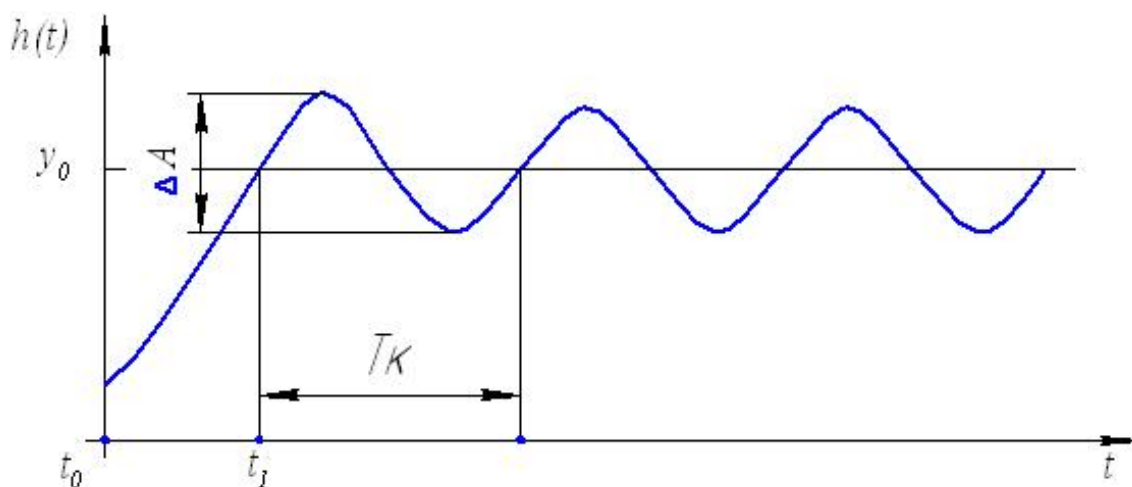


Рисунок 6. Переходная характеристика САУ, находящейся на границе устойчивости.  $y_0$  – заданное значение температуры.

Определяют  $T_K$  и  $K_{p \text{ крит}}$

Таблица 3 Рекомендуемые параметры настройки регулятора

Тип регулятора	Рекомендуемые параметры настройки регулятора	
	Метод конструкторского бюро «АГАВА»	Метод Циглера-Никольса
П	$K_p = 0,5K_{p \text{ крит}}$	$K_p = 0,55K_{p \text{ крит}}$
ПИ	$K_p = 0,45K_{p \text{ крит}}; K_I = \frac{1}{0,83T_K}$	$K_I = 0,35T_K$
ПИД	$K_p = 0,6K_{p \text{ крит}}; K_I = \frac{1}{0,5T_K}$ $K_D = 0,125T_K$	-

Рассмотренные методы достаточно просты, они позволяют обеспечить в системе заданный запас устойчивости, но не гарантируют обеспечения наилучших показателей качества регулирования. Часто приходится уточнять параметры настройки ПИД-регулятора для конкретных объектов управления.

## 2. Настройка параметров ПИД-регулятора совместно с объектом управления в процессе пуско-наладочных работ.

Суть настройки заключается в том, что параметры объекта непосредственно не определяются, а в скрытой форме оцениваются в процессе самой настройки, когда контур регулирования уже замкнут, но еще не настроен.

2.1 Настройка пропорциональной компоненты ПИД-регулятора аналогична методу настройки, описанному в п.1. САР выводят на границу устойчивости (характеристика 1 рисунок 7), увеличивая значение  $K_p$ . Возможные варианты кривых переходной характеристики приведены на рисунке 7.

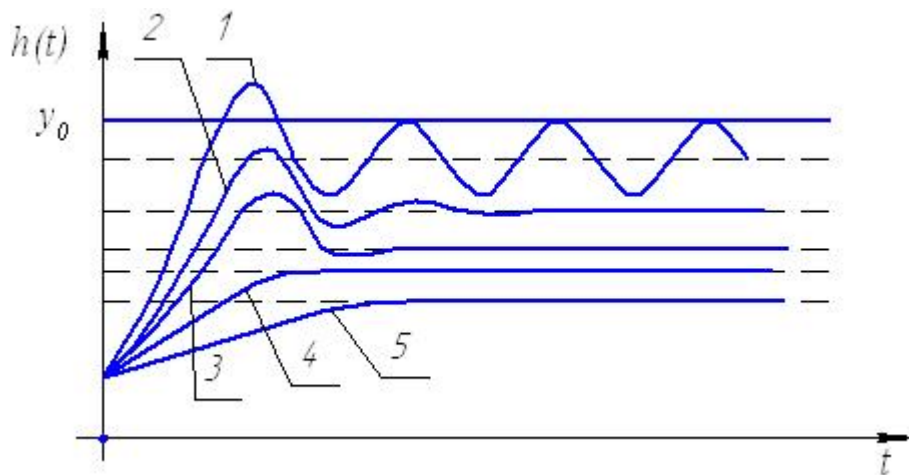


Рисунок 7. Вид переходных процессов в САР при различных значениях  $K_p$

Характеристика 1. Значение коэффициента  $K_p$  пропорциональной компоненты регулятора очень велико и его следует уменьшить.

Характеристика 2. Для этой кривой характерны затухающие колебания (3...5 периодов). Если в дальнейшем предполагается использовать и дифференцирующую составляющую ПИД-регулятора, то выбранное значение  $K_p$  является оптимальным. Для этого случая настройка пропорциональной компоненты считается законченной. Если дифференцирующая компонента использоваться не будет ( $K_D = 0$ ), то рекомендуется уменьшить  $K_p$  так, чтобы получились переходные характеристики типа 3 или 4.

Характеристика 3. В этой переходной характеристике имеет место небольшое перерегулирование и достаточно быстрое затухание колебаний (1...2 периода). Этот тип переходной характеристики обеспечивает хорошее быстродействие и быстрый выход на заданную температуру. В большинстве случаев его можно считать оптимальным, если в САР допускается перерегулирование или при резком изменении возмущающего воздействия, например, при выгрузке и загрузке деталей, закаливаемых в печи.

Характеристика 4. Регулируемый параметр (температура в печи) плавно подходит к установившемуся значению без перерегулирования. Этот тип переходной характеристики также можно считать оптимальным, однако быстродействие САР несколько снижено.

Характеристика 5. Сильно затянутый переход к установившемуся значению говорит о том, что коэффициент  $K_p$  чрезмерно занижен.

Динамическая и статистическая точность регулирования здесь мала. Рекомендуется увеличить значение  $K_p$ .

Во всех рассмотренных случаях в системе регулирования имеет место статистическая ошибка, величина которой тем больше, чем меньше значение  $K_p$ .

2.2 Настройка коэффициента  $K_D$  - дифференцирующей составляющей ПИД-регулятора.

Этот этап присутствует, если будет использован полнофункциональный ПИД-регулятор. Предположим, что на этапе 2.1 установлен коэффициент пропорциональной компоненты регулятора, соответствующий переходной характеристике 1, показанной на рисунке 8 в которой присутствует небольшое перерегулирование ( $G \leq 25\%$ ).

В этом случае необходимо выбрать такое значение  $K_D$ , чтобы переходная характеристика имела вид кривой 2.

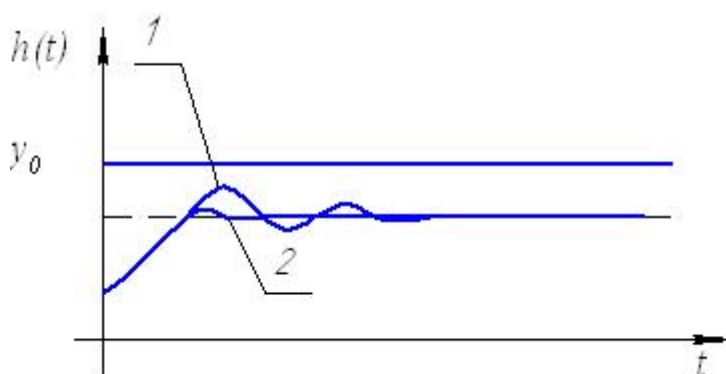


Рисунок 8. Переходная характеристика при использовании дифференцирующей компоненты регулятора

В качестве первого приближения коэффициент  $K_D$  выбирают по формуле

$$K_D = 0,2T_K$$

где  $T_K$  – период колебаний (рисунок 6).

Изменяя величину  $K_D$  снижают колебательность САР до требуемого уровня (например ( $G \leq 5\%$ )).

Если дифференцирующая компонента применяется не будет (используется ПИ-регулятор), то следует перейти к этапу 2.3.

### 2.3 Настройка коэффициента $K_I$ - интегрирующей составляющей ПИД-регулятора.

После настройки пропорциональной и, при необходимости, дифференцирующей компоненты ПИД-регулятора, получается переходная характеристика 1, показанная на рисунке 9.

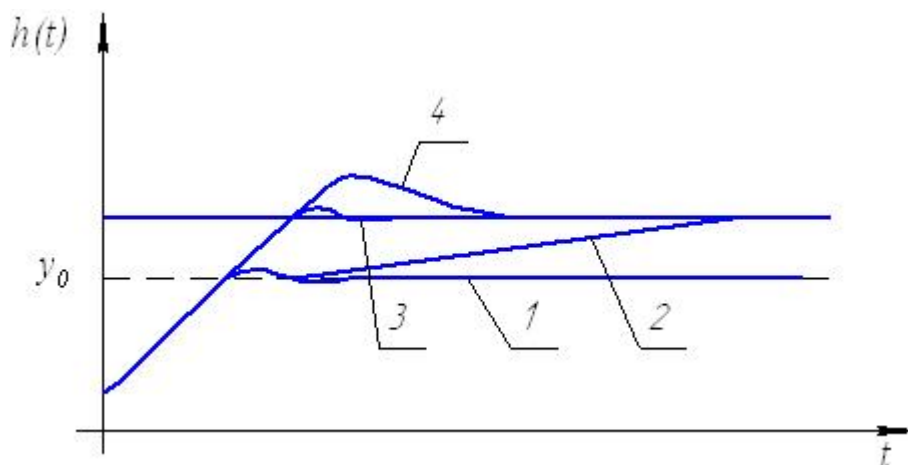


Рисунок 9. Переходные характеристики САР

Начальное значение  $K_I$  выбирают равным:  $K_I \approx 0,5T_K$ .

Возможные варианты переходных характеристик приведены на рисунке 9.

Характеристика 2. Такая кривая получается при малом значении  $K_I$ . Выход к установившемуся значению затянут и в этом случае рекомендуется увеличить  $K_I$ .

Характеристика 4 получается при слишком большой величине  $K_I$ . Имеет место возрастание времени переходного процесса, за счет перерегулирования.

Характеристика 3. Значение коэффициента  $K_I$  выбрано оптимально.

Интегрирующая компонента ПИД-регулятора устраняет статистическую ошибку, т.е. рассогласование между установившемся значением регулируемого параметра (температуры) и его заданным значением.

### 3. Расчет параметров ПИД-регулятора при настройке САР на технический оптимум

В системах автоматического управления технологическими процессами широкое применение находит настройка на технический оптимум [2]. Она характеризуется малым перерегулированием ( $G \leq 4,3\%$ ) и достаточно высоким

быстродействием, которое зависит от малой некомпенсируемой постоянной времени остающейся в контуре.

В лабораторной работе №1 определена передаточная функция печи, которая имеет вид

$$W_{\Pi}(p) = \frac{\kappa_{об} e^{-\tau_0 p}}{(Tp + 1)^2} = \frac{\kappa_{об} e^{-\tau_0 p}}{T^2 p^2 + 2Tp + 1}$$

Разложим  $e^{-\tau_0 p}$  в ряд по степеням  $p$

$$e^{-\tau_0 p} = \frac{1}{e^{\tau_0 p}} = \frac{1}{1 + \tau_0 p + \frac{(\tau_0 p)^2}{2} + \dots}$$

и ограничимся двумя членами ряда

$$e^{-\tau_0 p} \approx \frac{1}{1 + \tau_0 p}$$

т.е. звено чистого запаздывания приближенно заменим инерционным звеном.

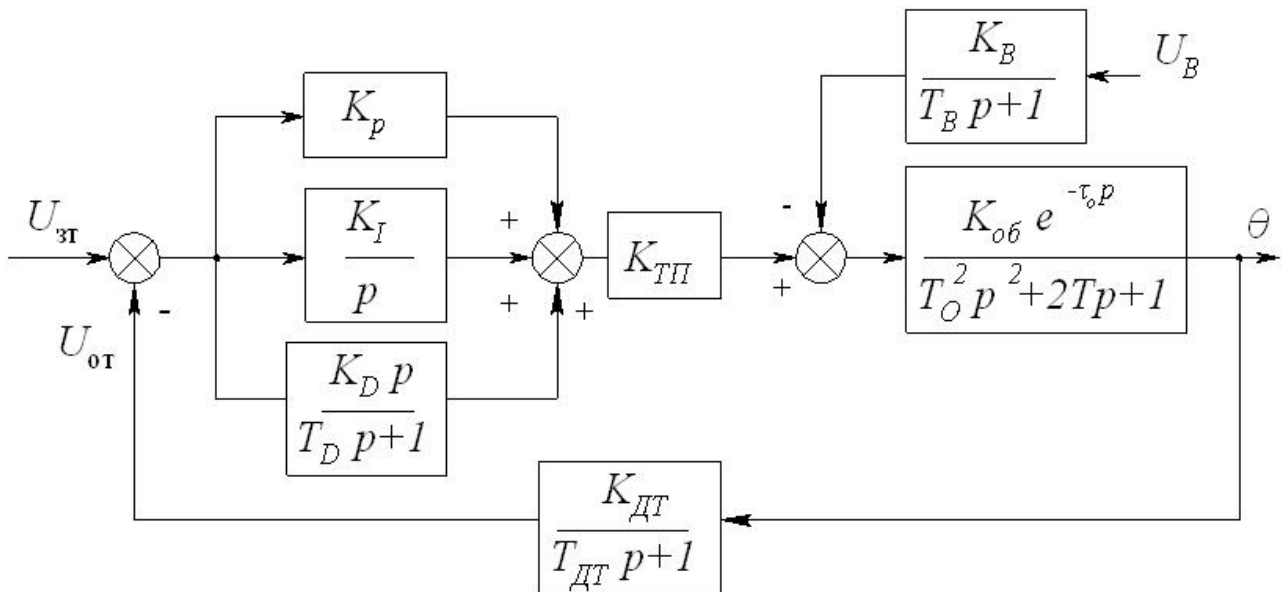


Рисунок 10. Структурная схема САР тепловым объектом

Передаточную функцию ПИД-регулятора (14) приведем к виду

$$\begin{aligned} W_{\text{Пер}}(p) &= \frac{K_p T_D p^2 + K_p p + K_I T_D p + K_I + K_D p^2}{p(T_D p + 1)} \\ &= K_I \frac{\left[ \left( \frac{K_p T_D + K_D}{K_I} \right) p^2 + \left( \frac{K_p + K_I T_D}{K_I} \right) p + 1 \right]}{p(T_D p + 1)} \end{aligned}$$

Компенсируем инерционность объекта (печи) форсирующим действием ПИД-регулятора, т.е. осуществим настройку регулятора в соответствии с условиями

$$\frac{K_p T_D + K_D}{K_I} = T^2; \quad \frac{K_p + K_I T_D}{K_I} = 2T \quad (15)$$

Тогда структурная схема САР будет иметь вид

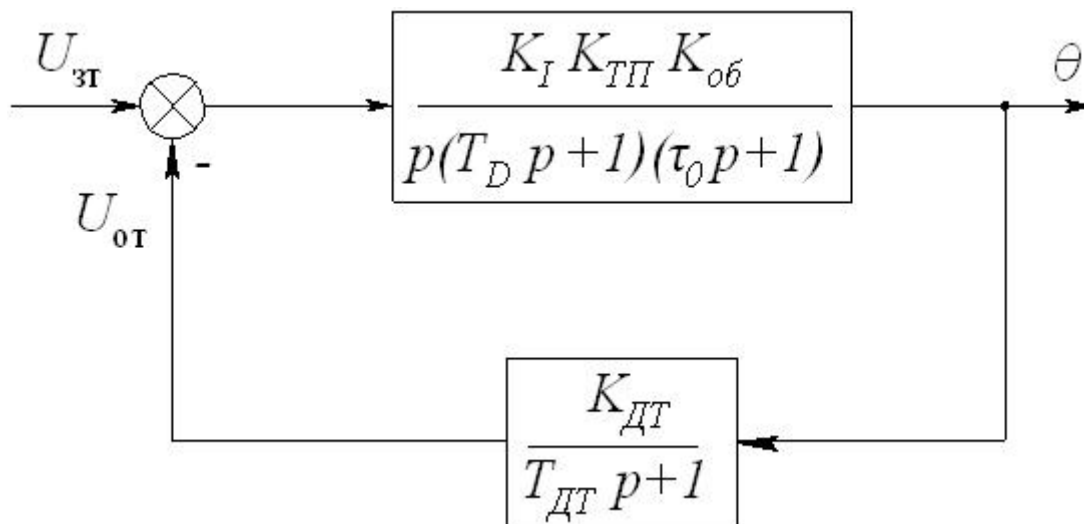


Рисунок 11. Структурная схема САР с учетом настройки ПИД-регулятора

Передаточная функция разомкнутой САР определяется выражением

$$W_{\text{раз}}(p) = \frac{K_I K_{\text{ТП}} K_{\text{об}} \cdot K_{\text{ДТ}}}{p(T_D p + 1)(\tau_o p + 1)(T_{\text{ос}} p + 1)} \quad (16)$$

При настройке на технический оптимум (ТО) передаточная функция разомкнутой САР должна иметь вид

$$W_{\text{раз}}^{\text{ТО}}(p) = \frac{1}{2T_\mu p(T_\mu p + 1)} \quad (17)$$

где  $T_\mu$  - малая некомпенсируемая постоянная времени контура.

Заменим малые постоянные времени, имеющиеся в контуре (формула 16), суммарной постоянной времени, пренебрегая членами высокого порядка малости

$$(T_D p + 1)(\tau_o p + 1)(T_{\text{ос}} p + 1) \approx (T_D + \tau_o + T_{\text{ос}})p + 1$$

Принимаем  $T_{\mu} = T_D + \tau_o + T_{дт}$

Постоянную времени дифференцирующего звена принимаем малой:

$$T_D = (0,1 \dots 0,01)\text{с.}$$

Сравнивая (16) и (17) определяем коэффициент передачи интегрирующей части ПИД-регулятора

$$K_I = \frac{1}{2T_{\mu}K_{ТП}K_{об} \cdot K_{дт}} \quad (18)$$

Из формулы (15) определяются коэффициенты передачи пропорциональной и дифференцирующей частей ПИД-регулятора

$$K_p = (2T - T_D) \cdot K_I \quad (19)$$

$$K_D = K_I T^2 - K_p \cdot T_D \quad (20)$$

#### 4. Порядок выполнения лабораторной работы

4.1 В программном продукте VISSIM создать модель САР тепловым объектом (рисунок 10).

Принять:  $K_{ТП} = 10$  ;  $T_D = (0,1 \dots 0,01)\text{с}$  ;  $K_{дт} = 0,0125 \frac{\text{В}}{\text{°С}}$  ;  $T_{дт} = 1,5\text{с}$ .

$K_{об}$  ,  $T$  ,  $\tau_o$  - из лабораторной работы №1.

4.2 Снять переходные процессы нагревательной печи по управляющему и возмущающему воздействиям без работы системы управления. При этом изменять  $K_B$ ,  $T_B$  и время воздействия  $U_B$  , определяя характер и величину снижения температуры печи  $\theta(t)$  (рисунок 5).

4.3 Для замкнутой системы осуществить настройку САР сначала с П-регулятором . Изменяя величину  $K_p$  определить и построить зависимости времени переходного процесса и перерегулирование переходного процесса. Выбрать оптимальное значение  $K_p$ . Затем использовать ПИ и ПИД-регуляторы. Изменяя значения  $K_I$  и  $K_D$  определить вид переходных процессов системы регулирования температуры печи методами, рекомендуемыми в п.1. Варьируя значениями  $K_p$ ,  $K_I$ ,  $K_D$  попытаться улучшить вид переходных процессов, снизив перерегулирование (или повысив быстродействие для затянутых переходных процессов).



4.4 Осуществить настройку параметров ПИД-регулятора методом, изложенным в п.2. В отчете привести характерные переходные процессы, аналогичные показанным на рисунках 7, 8, 9 при конкретных значениях  $K_p$ ,  $K_I$ ,  $K_D$ . Особое внимание обратить на вид переходных процессов по возмущающему воздействию.

4.5 Осуществить настройку параметров ПИД-регулятора расчетным методом, изложенным в п.3.

По формуле (18) вычислить  $K_I$ . По формулам (19) и (20) вычислить  $K_p$ ,  $K_D$ . Снять переходные процессы замкнутой САР.

4.6 Выполнить настройку ПИ-регулятора для случая, когда

$$W_{\Pi}(p) = W'_{\text{экс}}(p) = \frac{K_{\text{об}} \cdot e^{-\tau_0 p}}{Tp + 1},$$

компенсируя инерционность печи. Снять соответствующие переходные процессы.

## 5. Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Привести структурную схему САР тепловым объектом.
3. Результаты исследования нагревательной печи без системы управления.
4. Результаты исследования замкнутой САР нагревательной печью с П-, ПИ-, ПИД-регуляторами с различными видами настройки.
5. Выводы по работе.

## Список литературы

1. Дьяконов В.П. VISSIM+ MATHCAD+ MATLAB. Визуальное математическое моделирование. - М.: САЛОН -Пресс, 2004.-384с.
2. Герман-Галкин С.Г. MATLAB & SIMULINK Проектирование мехатронных систем на ПК. - СПб.: Корона-Век, 2008.-368с.
3. Бессекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. -4-е изд. – СПб, Изд-во «Профессия», 2003 -752с.
4. Наладка средств автоматизации и автоматических систем регулирования: Справочное пособие / А.С.Клюев, А.Т.Лебедев, С.А.Клюев, А.Г.Товарнов; Под ред. А.С.Клюева – 2-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 368 с.
5. Балакирев В.С., Дудников Е.Г., Цирлин А.М. Экспериментальное определение динамических характеристик промышленных объектов управления. – М.: Энергия, 1967. – 232 с.
6. [www. Kb – agava.ru](http://www.Kb-agava.ru)

Лебединский Борис Петрович

Постных Виктор Николаевич

**Моделирование тепловых процессов в автоматизированных  
технологических системах**

Методические указания  
к выполнению лабораторных работ  
по дисциплинам «Моделирование систем и процессов»  
для студентов очной и заочной форм обучения  
специальности 220301 «Автоматизация технологических процессов и  
производств (в машиностроении)»

Авторская редакция

---

Подписано к печати 06.03.2014	Формат 60x84 1/16	Бумага тип. №1
Печать цифровая	Усл. печ. л. 1,75	Уч.-изд. л. 1,75
Заказ 73	Тираж 50	Не для продажи

---

РИЦ Курганского государственного университета.

640669, г. Курган, ул. Гоголя, 25.

Курганский государственный университет.