

ВВЕДЕНИЕ

В данном пособии использованы преимущественно результаты испытаний систем регулирования, приведенные в [1]. Также автор использовал собственный опыт по разработке и наладке систем регулирования. При изложении материала автор стремился минимизировать количество формул и в максимально доступной форме изложить вопросы как теории автоматического регулирования, так и нечеткой логики и нейронных сетей.

1. СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ (САР)

Из всего разнообразия систем автоматического регулирования наиболее широко распространена система автоматического регулирования по отклонению. Структурная схема одноконтурной системы автоматического регулирования подобного типа приведена на рисунке 1.

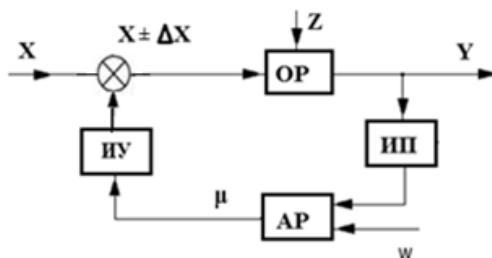


Рис. 1

Одноконтурная САР:

ОР — объект регулирования; **АР** — автоматический регулятор; **ИП** — измерительный преобразователь; **ИУ** — исполнительное устройство; **W** — заданное значение регулируемой величины **Y**; **Z** — возмущающее воздействие на объект; **X** — регулирующее воздействие на объект; **μ** — выходной сигнал регулятора.

Особенности работы приведенной схемы начнем с рассмотрения свойств объектов регулирования.

2. СВОЙСТВА ОБЪЕКТОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Объект регулирования является той частью установки, где необходимо поддерживать регулируемую величину (Y) на постоянном уровне. Например, температура в печи; ее значение измеряется термометром сопротивления или термопарой, и полученный электрический сигнал подается на вход регулятора.

Объекты регулирования делятся на объекты с самовыравниванием и без самовыравнивания. Объекты без самовыравнивания называются астатическими, а обладающие самовыравниванием — статическими.

Объекты без самовыравнивания трудно поддаются управлению. Самовыравнивание может быть положительным и отрицательным. В первом случае равновесие восстанавливается без участия регулятора. В случае отрицательного самовыравнивания восстановление равновесия осуществляется только при участии регулятора. Это объясняется тем, что возникшее нарушение в объекте стремится к накоплению. При отрицательном самовыравнивании объект называется неустойчивым статическим, а при положительном — устойчивым статическим объектом.

2.1. Объекты с самовыравниванием

Если объект регулирования является объектом с самовыравниванием, то это означает следующее. Если задать произвольный управляющий сигнал при помощи регулятора, переведенного в ручной режим, и дождаться устойчивого регулируемого значения Y , то всегда установится значение регулируемой величины, пропорциональное управляющему сигналу.

Если измерить так называемую статическую характеристику объекта (регулируемое значение в зависимости от управляющего сигнала), то в большинстве случаев она окажется нелинейной.

Пример: при измерении статической характеристики объекта повышаем управляющий сигнал шагами по 10% и ожидаем установления устойчивого значения регулируемого параметра объекта. При этом мы увидим, что при том же изменении управляющего сигнала прирост параметра будет, как правило, больше при низких значениях параметра, чем при высоких. Понятно, что это будет сказываться на динамической характеристике объекта регулирования.

Динамической характеристикой объекта регулирования называется зависимость изменения во времени выходной величины объекта

в переходном режиме, то есть в режиме перехода из одного состояния в другое. При этом предполагается, что неустановившийся (переходный) режим вызван однократным ступенчатым скачкообразным возмущением входной величины (регулирующим воздействием или внешним возмущением). Динамическая характеристика объекта также называется **кривой разгона** и является важной характеристикой объекта при реализации САР.

Для нашего примера характеристика нелинейна и напоминает кривую заряда конденсатора (рис. 2).

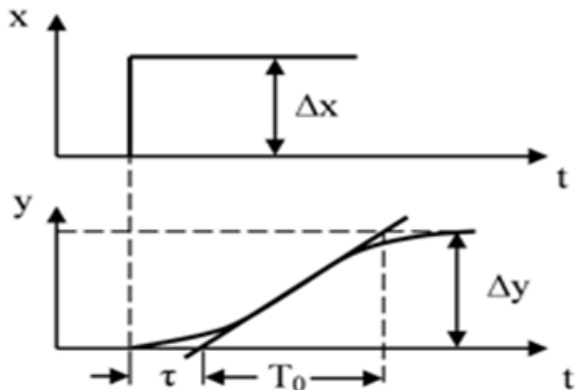


Рис. 2

Переходная характеристика объекта с самовыравниванием

Нелинейность является одной из причин того, что может оказаться необходимым менять параметры регулятора при различных заданных значениях, чтобы улучшить поведение системы регулирования.

2.2. Объекты без самовыравнивания

Объект регулирования без самовыравнивания реагирует на управляющий сигнал постоянным изменением регулируемого значения. Отклонение регулируемого значения зависит от свойств объекта и пропорционально величине управляющего сигнала и времени.

Если управляющий сигнал равен нулю, то регулируемое значение остается неизменным. Если управляющий сигнал меняется скачком, то регулируемое значение начинает равномерно меняться (рис. 3). Изменение тем быстрее, чем больше подаваемый управляющий сигнал. В силу их интегрирующего свойства такие объекты называются интегрирующими.

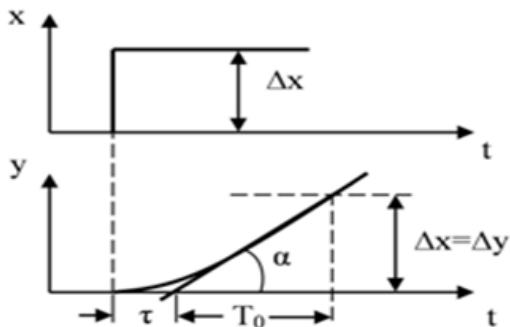


Рис. 3

Переходная характеристика объекта без самовывравнивания

На рисунках 2 и 3 τ — время запаздывания реакции объекта на входное воздействие Δx , а T_0 — постоянная времени объекта, характеризующая его инерционность.

Если на объект без самовывравнивания подается управляющий сигнал, регулируемое значение будет непрерывно меняться, пока не достигнет границы допустимого диапазона.

В контуре регулирования можно влиять на текущее значение регулируемого параметра при помощи управляющего воздействия (X). Управляющее воздействие в случае, например с печью, представлено потоком топливного газа. Как правило, регулятор не может непосредственно задавать управляющее воздействие, поэтому используются исполнительные устройства. Регулятор управляет исполнительным элементом посредством управляющего сигнала (μ). В примере с печью в качестве исполнительного устройства используется регулирующий клапан в трубопроводе топливного газа.

Если регулятор выдает управляющий сигнал 100%, то на объект управления подается максимальное количество газа. Аналогично, при управляющем сигнале 50% в объект подается вдвое меньшее количество газа. При помощи управляющего сигнала (в нашем примере лежащего в диапазоне 0–100%) регулятор добивается равенства текущего регулируемого значения заданному значению (w). Разность между заданным и регулируемым значением ($w - y$) называется рассогласованием регулируемой величины (ϵ).

Изменения возмущающего воздействия (z) приводят к нежелательным изменениям регулируемой величины.

2.3. Период дискретизации

Работа современных измерительных преобразователей и регулирующих устройств основана на использовании микропроцессоров, которым требуется время на вычисления. Измеряемое значение регистрируется датчиком и после обработки в преобразователе выдается как аналоговая величина в том или ином виде. После обновления состояния выхода снова происходит измерение входного сигнала.

Время между считываниями входного сигнала называется периодом дискретизации.

Период дискретизации важен для регуляторов, в особенности при обработке текущего регулируемого значения. В этом случае период дискретизации равен времени считывания входного сигнала, вычисления и выдачи управляющего сигнала до нового считывания. Эта величина для регуляторов, реализуемых программным способом в контроллерах, устанавливается в современных программно-технических комплексах (ПТК) при настройке системы автоматизации.

Типичные периоды дискретизации в системах автоматического регулирования лежат в диапазоне 50–250 мс. Для большинства применений в технике управления процессами, например в нефтяной и газовой промышленности, достаточно уже 250 мс. Для быстропеременных процессов (например, при измерении и регулировании давления) САР может работать с меньшим периодом дискретизации.

По способу реализации регуляторы подразделяются на регуляторы, реализованные программным способом в контроллерах, и регуляторы, реализованные в виде отдельного электронного прибора с входами, выходами и органами управления на панели прибора.

Стандартная схема реализации программным способом регулятора с линейным законом регулирования приведена на рисунке 4. Где PID — функциональный блок ПИД-регулятора, AI — функциональный блок аналогового ввода величины параметра «ПАРАМ1», АО — функциональный блок аналогового вывода управляющего воздействия μ регулятора.

В дальнейшем все выводы применимы как к физически реализуемым регуляторам, так и к регуляторам, реализованным программным способом в контроллерах.

В зависимости от параметров объекта регулирования и необходимого качества регулирования находятся настроечные параметры регуляторов (их обычно называют «параметры настройки»). Основными параметрами настройки являются коэффициент усиления, постоянная времени интегрирования, постоянная времени дифференцирования.

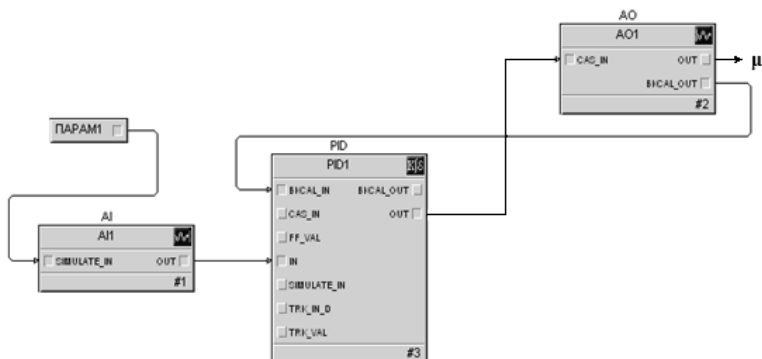


Рис. 4

*Регулятор с линейным законом регулирования
(программная реализация в контроллере
на языке функциональных блоков по стандарту IEC 61131-3)*

Кроме органов настройки основных параметров, регуляторы имеют также органы настройки, косвенно влияющие на эти коэффициенты или на режимы работы регуляторов, например, органы настройки, изменяющие чувствительность регулятора (зона нечувствительности), демпфирование входного сигнала и др.

Для управления рядом исполнительных элементов, например с серводвигателями, лучше всего подходят так называемые позиционные регуляторы со слежением за положением регулирующего органа (РО) или трехпозиционные ступенчатые (шаговые) регуляторы без функции отслеживания за положением РО. Два выхода регулятора посредством серводвигателя управляют открыванием и закрыванием исполнительного элемента.

Серводвигатель — это двигатель с обратной связью, которой можно управлять, чтобы либо достичь требуемой скорости (и, следовательно, крутящего момента), либо получить нужный угол поворота в ту или иную сторону. С этой целью устройство обратной связи посылает сигналы в цепь контроллера сервомотора, сообщая о скорости и об угловом положении РО.

Если в результате более высоких нагрузок скорость окажется ниже требуемой величины, ток будет увеличиваться до тех пор, пока скорость не достигнет нужной величины. Если сигнал скорости показывает, что скорость больше, чем нужно, ток соответственно уменьшается.

При постоянном управляющем сигнале имеет место следующее соотношение:

$$\Delta y = K \cdot \Delta x \cdot t, \quad (1)$$

где K — передаточный коэффициент объекта регулирования без самовыравнивания; Δx , Δy — управляющий и регулируемый сигналы; t — время.

Для меняющегося управляющего сигнала формула принимает следующий вид:

$$\Delta y = K \cdot \int_{t_0}^t x dt. \quad (2)$$

Пример: пусть управляющий сигнал повышается скачком от 50 до 80%, и датчик с задержкой 10 с регистрирует изменение некоего параметра, например, расхода со 100 до 160 т/ч. То есть время запаздывания будет равно 10 с.

Передаточный коэффициент получается из изменения регулируемого значения, поделенного на изменение управляющего сигнала:

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{160 - 100}{80 - 50} = 2 \frac{т}{ч \cdot \%}.$$

Передаточный коэффициент 2 т/(ч·%) означает, что если повысить управляющий сигнал на 1%, расход возрастет на 2 т/ч.

2.4. Объекты с задержкой: P_n -объекты

У объектов с задержками регулируемое значение после задания управляющего сигнала устанавливается через некоторое время. Задержку, обычно ее характеризуют временем запаздывания τ , можно объяснить тем, что энергия в контуре регулирования проходит через несколько накопителей, которые необходимо заполнить.

Такие объекты можно математически описать уравнением, которое для каждого накопителя энергии содержит экспоненциальный член. В силу этого подобные объекты называются объектами первого, второго, третьего и т. д. порядка.

2.5. Объекты с одной задержкой (1-й порядок)

У объектов с одной задержкой, т. е. с одним накопителем энергии, регулируемая величина при скачкообразном изменении управляющего сигнала начинает меняться немедленно и все медленней стремится к конечному значению (рис. 5).

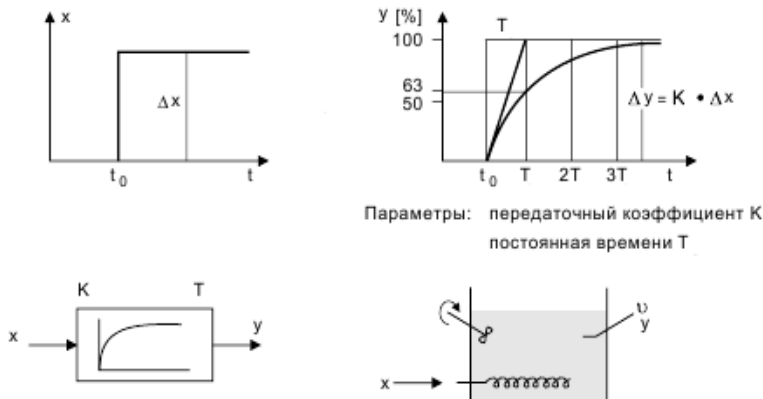


Рис. 5

Объект 1-го порядка: P_{11} -объект

На рисунке 5 справа показан пример, изображающий объект 1-го порядка: в емкости имеется только один накопитель энергии, это вода. Энергия, поступающая от исполнительного элемента, немедленно преобразуется нагревательной спиралью в тепловую энергию (нагревательная спираль не накапливает энергию, она нагревается без задержки). Тепловая энергия немедленно передается воде. Вода тут же начинает нагреваться. Считаем, что используемый датчик обладает очень малой массой и теплопроводность между водой и датчиком является очень хорошей. Если мы повышаем мощность нагрева (управляющее воздействие) скачком, то температура воды будет меняться в соответствии со следующим уравнением:

$$\Delta y = K \cdot \Delta x \cdot (1 - e^{-t/T}). \quad (3)$$

Как нам определить для этого объекта 1-го порядка параметры K и T ?

Пример: мы скачкообразно повышаем мощность, скажем, на 5 кВт и регистрируем регулируемое значение (температуру воды). Таким образом, мы имеем

$$\Delta x = 5 \text{ кВт.}$$

Перед скачком температура воды была 20°C, после скачка, допустим, она достигла 80°C. Отсюда получаем

$$\Delta y = 60^\circ\text{C.}$$

После записи переходной характеристики мы определяем передаточный коэффициент объекта регулирования по следующей формуле:

$$K = \Delta y / \Delta x = 12^\circ\text{C/кВт.}$$

То есть если мы повышаем мощность на 1 кВт, то температура возрастет на 12°C.

Теперь определим постоянную времени объекта регулирования.

Как правило, переходной процесс считается завершившимся за $3T$, где T — постоянная времени объекта, а $3T$ для объекта еще называют временем разгона. Время T определяется по графику переходного процесса в точке, где регулируемое значение достигает величины $(1 - 1/e) = (1 - 1/2,71828) = 63,2\%$ от нового установившегося значения, что иллюстрирует рисунок 6.

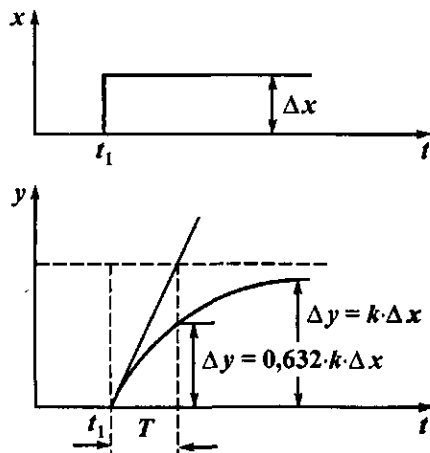


Рис. 6

Нахождение постоянной времени объекта T

Если регулируемая величина достигла значения 63,2% от требуемого $\Delta y = 60^\circ\text{C}$ за 100 с, то постоянная времени $T = 100$ с. Изменение регулируемого значения 63,2% в данном примере имеет место при температуре

$$20^\circ\text{C} + 60^\circ\text{C} \cdot 0,632 \approx 58^\circ\text{C}.$$

Время, по истечении которого достигается температура воды 58°C, соответствует постоянной времени $T = 100$ с (по формуле 3).

$$\Delta y = 12 \frac{^\circ\text{C}}{\text{кВт}} \cdot 5 \text{ кВт} \cdot (1 - e^{-t/100\text{с}}).$$

На рисунке 7 показана переходная характеристика нашего объекта регулирования.

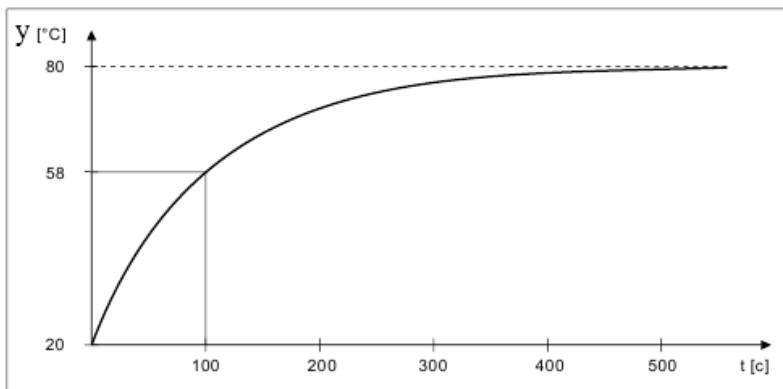


Рис. 7

График переходной характеристики объекта 1-го порядка

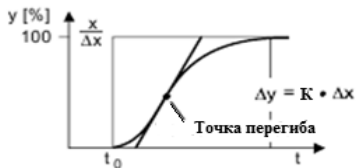
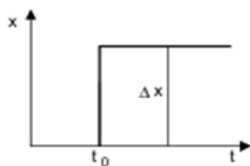
2.6. Объекты с двумя задержками (2-й порядок)

У объекта с двумя задержками имеются два накопителя энергии. Объект с двумя задержками называется P_{12} -объектом и определяется постоянными времени обоих накопителей энергии и передаточным коэффициентом.

Как видно из обозначений (рис. 8), для практического рассмотрения принимается, что первый передаточный коэффициент равен K , а второй равен 1.

На рисунке 8 показан пример объекта 2-го порядка, у которого энергия проходит через два накопителя. Если в водяной ванне в примере P_{11} -объекта нагреватель состоял из спирали, то здесь она заменена нагревательным стержнем. Нагревательный стержень обладает относительно большой массой, поэтому он представляет собой второй накопитель энергии.

Если мощность нагревателя меняется скачком с 0 кВт до некоторого фиксированного значения, то первая задержка потребует энергии для того, чтобы нагреть стержень. Лишь когда температура стержня станет заметно выше температуры воды, вода начнет нагреваться. По этой причине у таких объектов регулируемое значение после скачка управляющего сигнала возрастает с запаздыванием (рис. 8), и его скорость возрастания сначала растет, затем падает, пока не будет достигнуто конечное значение. Переходная характеристика (S-образная кривая или сигмоида) обладает областью с максимальным наклоном, в которой на рисунке 8 показана касательная.



Параметры: коэффициент K
постоянные времени T_1, T_2

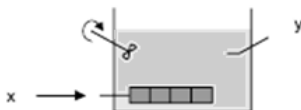
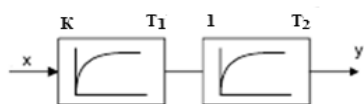


Рис. 8

Объект 2-го порядка: P_{12} -объект

С математической точки зрения максимальный наклон имеется только в одной точке, точке перегиба. На практике считается, что наклон остается постоянным в некоторой области вокруг точки перегиба, так как саму точку перегиба трудно определить. Если на объект 2-го порядка подан скачок управляющего сигнала, то регулируемая величина меняется согласно следующему уравнению:

$$y = K \cdot \Delta x \cdot \left(1 - \frac{T^1}{T^1 - T^2} e^{-t/T^1} + \frac{T^2}{T^1 - T^2} e^{-t/T^2}\right) \text{ для } T_1 \neq T_2. \quad (4)$$

Определение обеих постоянных времени по переходной характеристике сопряжено с непростыми математическими вычислениями. На практике объекты 2-го и высшего порядка характеризуются эквивалентными параметрами, как показано ниже.

2.7. Объекты высшего порядка

На практике объекты регулирования обладают более чем двумя накопителями энергии. Их переходные характеристики, однако, имеют тот же характер, как и у рассмотренного ранее объекта 2-го порядка. У них также имеется время запаздывания и область с максимальным наклоном.

Объекты, начиная со 2-го порядка (включая звенья с запаздыванием), характеризуются при помощи вспомогательных величин. Пользуясь эквивалентными параметрами и эмпирическими формулами, в дальнейшем можно определять параметры регулятора. Упомянутыми эквивалентными параметрами являются передаточный коэффициент

(K), время запаздывания (τ) и время выравнивания (T_g). Для определения этих параметров используется кривая переходного процесса.

Для этой цели на объект регулирования подается скачок управляющего сигнала и регистрируется кривая переходного процесса (рис. 9).



Рис. 9

Определение времен запаздывания и выравнивания

Наносят касательную на график. Время от скачка управляющего сигнала до точки пересечения касательной в точке перегиба с временной осью является временем запаздывания (τ); время от точки пересечения этой касательной с временной осью до точки ее пересечения с максимальным значением регулируемой величины соответствует времени выравнивания (T_g). Передаточный коэффициент получают как изменение регулируемого значения, деленное на скачок управляющего сигнала.

Пример: следует определить K, τ и T_g для промышленной печи. До начала работы температура в печи составляет 20°C. Теперь при помощи регулятора, переведенного в ручной режим, задается скачок управляющего сигнала от 0 до 50% и строится график регулируемого значения.

Проведем на уровне максимального регулируемого значения (520°C) прямую, параллельную оси времени.

Передаточный коэффициент объекта:

$$K = \frac{\text{Изменение регулируемой величины}}{\text{Изменение управляющего сигнала}} = \frac{500}{50} = 10.$$

Теперь нужно построить касательную в точке перегиба. Рассмотрим на графике регулируемого значения (рис. 9) слева направо после скачка точки 1', 2' и т. д. Начиная с 1', мы наносим касательные. Касательная в точке 1' идет относительно полого. Если мы перейдем к точкам, расположенным правее (2', 3'), то увидим, что касательные становятся все круче.

Двигаясь далее направо (4', 5'), мы видим, что касательные становятся положе. Таким образом определяется область максимального наклона. На рисунке 9 касательная в точке 3' обладает максимальным наклоном.

Теперь можно определить параметры τ и Tg , описанным выше способом. Эти три параметра объекта (K , τ и Tg) могут быть использованы для определения параметров регулятора.

Соотношение Tg/τ может служить мерой управляемости объекта:

$Tg/\tau > 10$ — хорошо управляемый;

$Tg/\tau = 10-3$ — управляемый;

$Tg/\tau < 3$ — плохо управляемый.

На практике задаются такие скачки управляющего сигнала, после которых значение регулируемой величины устанавливается на уровне дальнейшей рабочей точки. Это используется при расчете настроек регуляторов по методу Чина, Хронеса и Ресвика.

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru