

1. Классификация автоматических регуляторов
2. Принцип реализации алгоритмов регулирования в регуляторах

### 1. КЛАССИФИКАЦИЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ

*Автоматические регуляторы (АР)* представляют собой большую группу автоматических управляющих устройств, которые вырабатывают регулирующее воздействие в САР, если регулируемая величина отклонится от заданного значения.

В настоящее время находит применение большое разнообразие автоматических регуляторов, которые можно классифицировать по различным признакам:

- 1) В зависимости от требуемых значений регулируемого параметра различают регуляторы:
  - а) стабилизирующие* — поддерживающие постоянное значение регулируемого параметра;
  - б) программные* — обеспечивающие заданное изменение регулируемого параметра во времени с помощью специально заданной программы (станки ЧПУ);
  - в) следящие* — обеспечивающие закономерное изменение регулируемого параметра в зависимости от неизвестной заранее переменной величины (копировальные станки).
- 2) По способу использования энергии различают регуляторы:
  - а) прямого действия*, когда регулятор и регулирующий орган используют энергию только от измерительного устройства;
  - б) непрямого действия*, когда регулятор или регулирующий орган используют энергию внешнего источника.
- 3) По виду используемой вспомогательной энергии регуляторы непрямого действия делятся на:
  - а) электрические,*
  - б) гидравлические,*
  - в) пневматические*
  - г) комбинированные.*
- 4) По характеру воздействия одних устройств на другие регуляторы бывают:
  - а) непрерывного действия*
  - б) прерывистого (дискретного) действия.*
- 5) По установившемуся значению регулируемого параметра после окончания переходного процесса регуляторы бывают
  - а) статические* – в таких регуляторах в установившемся состоянии погрешность не равна нулю и зависит от величины нагрузки на объект, т.е. равновесное значение регулируемого параметра всегда отличается от заданной величины, и только при номинальной нагрузке фактическое значение становится равным номинальному.
  - б) астатические* - такие регуляторы после возмущения приводят регулируемый параметр к заданному значению независимо от величины нагрузки и положения регулирующего органа.
- 6) По числу фиксированных положений (позиций) различают:  
*двух-, трех- и многопозиционные регуляторы.* Например, у двухпозиционного регулятора две возможные позиции регулирующего органа: «включено — выключено».
- 7) По скорости перемещения регулирующего органа различают регуляторы:
  - а) позиционные регуляторы релейного действия* с мгновенным практически перемещением;
  - б) регуляторы релейного действия* с постоянной скоростью перемещения, не зависящей от абсолютного значения рассогласования (лишь направление перемещения зависит от знака рассогласования);
  - в) с переменной скоростью, зависящей от знака и величины рассогласования;*
  - г) вибрационные регуляторы* с вибрационным (скользящим) режимом у регуляторов релейного действия.
- 8) По количеству регулируемых параметров различают регуляторы:
  - а) с одномерным регулированием* - регулирование по одному параметру;
  - б) с многомерным регулированием* - регулирование двух и более параметров.

9) По области своего применения регуляторы делятся на:

- а) индивидуальные,
- б) специализированные
- в) универсальные.

## 2. ПРИНЦИП РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ В РЕГУЛЯТОРАХ

Важнейшим свойством любого регулятора является *алгоритм* (закон) регулирования:

$$u_p = f(x_p; t) \quad (1)$$

где  $u_p$  – выходной сигнал регулятора;

$x_p$  – входящий сигнал регулятора, равный величине рассогласования;

$t$  – время.

Рассмотрим примеры реализации алгоритмов регулирования в регуляторах

### ДВУХПОЗИЦИОННЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ

Двухпозиционные регуляторы обеспечивают хорошее качество регулирования для инерционных объектов с малым запаздыванием, не требуют настройки и просты в эксплуатации. Эти регуляторы представляют обычный и наиболее широко распространенный метод регулирования.

Двухпозиционные регуляторы используются для управления переключательными элементами:

электромеханическими реле, контакторами, транзисторными ключами, симисторными или тиристорными устройствами, твердотельными реле и др.

В простейшем случае (без обратной связи) двухпозиционный регулятор работает как двухпозиционный переключатель. Например, мощность, подаваемая на нагреватель, имеет только два значения - максимальное и минимальное (нулевое), две позиции (отсюда и название регулятора - двухпозиционный) - нагреватель полностью включен или полностью выключен.

Структурная схема двухпозиционной системы регулирования приведена на рис. 1.

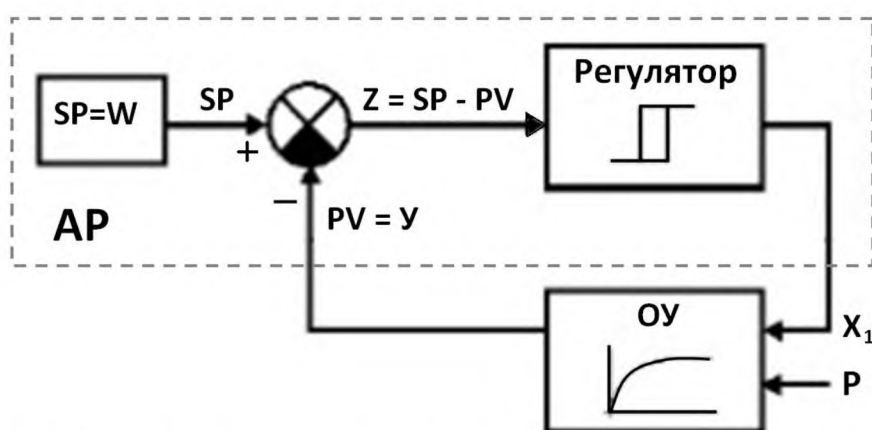


Рис. 1 Структурная схема двухпозиционной системы регулирования

где: AP – двухпозиционный регулятор,

OY – объект управления,

SP – узел формирования заданной точки (задания),

Z – рассогласование регулятора,

PV=Y – регулируемая величина,

X<sub>1</sub> – управляющее воздействие,

P – возмущающее воздействие.

Для примера приведем описание работы двухпозиционного регулирования температуры в электропечи печи:

1)  $\Theta < \Theta_{зд}$  - нагреватель включен, пока температура в печи  $Y = \Theta$  не достигнет заданного значения  $SP = \Theta_{зд}$ .

2)  $\Theta > \Theta_{зд}$  - нагреватель отключается, если регулируемая величина  $\Theta$  выше заданной  $\Theta_{зд}$ .

3) Повторное включение нагревателя происходит после уменьшения температуры до значения  $SP - H$ , т.е. с учетом гистерезиса  $H$  переключающего элемента.

Гистерезис  $H$  предусмотрен для предотвращения «дребезга» управляющего выходного устройства (например, реле) и исполнительного механизма (например, нагревательного элемента), т.е. слишком частого включения (отключения) нагревателя вблизи задания  $SP$ .

Типы статических характеристик двухпозиционных регуляторов показаны на рис. 2.

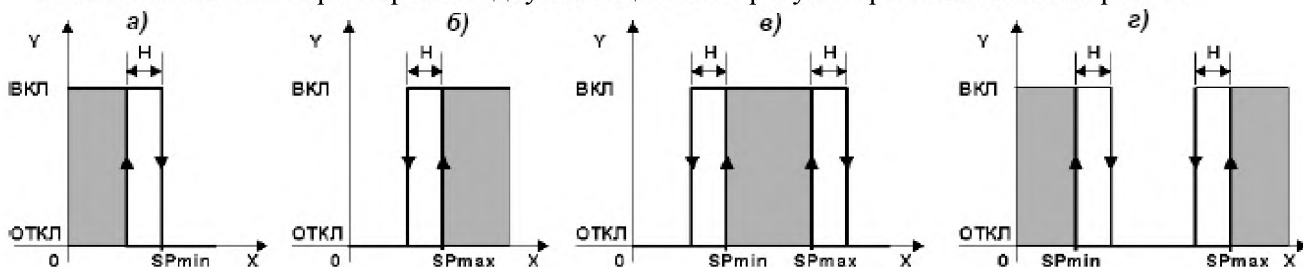


Рис. 2 Статические характеристики двухпозиционных регуляторов

Вид статической характеристики, представленный на рис. 2,а обычно применяется в различных процессах управления нагревом - нагревательных приборах, печах, термошкафах, теплообменниках и т.п. Данный тип регулятора называется обратным регулятором. При использовании в системах сигнализации данная логика работы выходного устройства носит название «меньше установленного значения» или «меньше минимума».

Вид статической характеристики, представленный на рис. 2,б: обычно применяется в различных процессах управления охлаждением – в системах вентиляции, в холодильных установках и т.п. Данный тип регулятора называется прямым регулятором. При использовании в системах сигнализации данная логика работы выходного устройства носит название «больше установленного значения» или «больше максимума».

Виды статических характеристик, представленные на рис. 2,в и 2,г применяются для сигнализации выхода системы управления на рабочий режим. Эти регуляторы еще называют компараторами.

Характеристика на рис.2,в используется для сигнализации вхождения параметра в норму. Данная логика работы выходных устройств имеет наименование «в зоне установленных значений» или «в зоне минимум-максимум».

Характеристика на рис.2,г используется для сигнализации выхода параметра за определенные пределы. Данная логика работы выходных устройств имеет наименование «вне зоны установленных значений» или «вне зоны минимум-максимум».

## ТРЕХПОЗИЦИОННЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ

Трехпозиционные регуляторы обеспечивают хорошее качество регулирования для инерционных объектов с малым запаздыванием.

Трехпозиционные регуляторы применяются как и двухпозиционные для управления переключаемыми элементами.

Трехпозиционные регуляторы используются для систем управления уровнем различных веществ, для систем управления нагреванием-охлаждением различных тепловых процессов, холодильных установок, регулирования микроклимата подогревателем и вентилятором, для систем распределения и смешивания различных потоков веществ с помощью трехходовых клапанов, кранов, смесителей, реверсивных электродвигателей, сервоприводов и др.

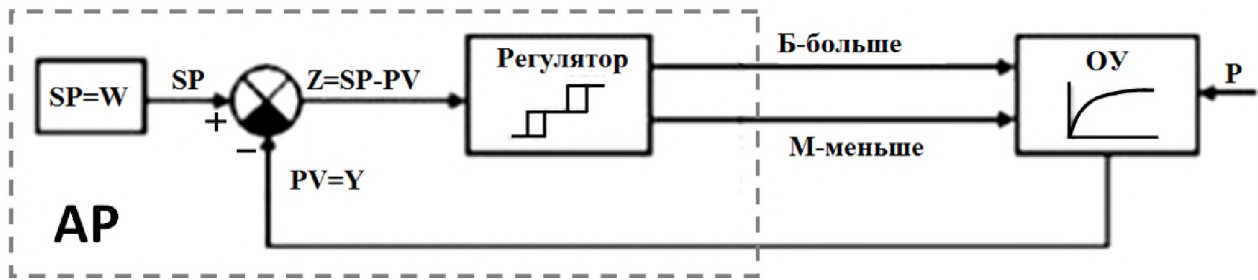


Рис. 3 Структурная схема трехпозиционной системы регулирования сигналы Б (больше) и М (меньше) - управляющие воздействия

Рассмотрим работу трехпозиционного регулятора для регулирования температуры  $\Theta$  в печах типа электросопротивления. При этом задают два значения температуры  $\Theta_{зд.макс}$  и  $\Theta_{зд.мин}$ .

- 1) Нижний уровень  $\Theta < \Theta_{зд.мин}$  - при уменьшении уровня ниже уставки  $\Theta_{зд.мин}$ , сигналом Б (больше) включится электронагреватель на «треугольник» на линейное напряжение 380 В
- 2) Норма  $\Theta_{зд.мин} < \Theta_n < \Theta_{зд.макс}$  - если уровень температуры восстановится до нормального  $\Theta_n$ , то сигналом М (меньше) включится электронагреватель на «звезду» на фазное напряжение 220 В.
- 3) Верхний уровень  $\Theta > \Theta_{зд.макс}$  - если уровень станет выше уставки  $\Theta_{зд.макс}$ , то электронагреватель отключится совсем.

Таким образом регулятор работает по закону:  $\Theta_{зд.мин}$  (нижний уровень) -  $\Theta_n$  (норма-средний уровень) -  $\Theta_{зд.макс}$  (верхний уровень).

При управлении электродвигателем исполнительного механизма трехпозиционный регулятор включает его при помощи переключательных элементов на правое вращение (1 позиция), останавливает (2 позиция) или включает на левое вращение (3 позиция).

Более распространённые современные процессы авторегулирования реализуются с применением линейных алгоритмов.

### ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫЙ РЕГУЛЯТОР (П-регулятор)

*Пропорциональными, или статическими* называют автоматические регуляторы, у которых при отклонении регулируемой величины от заданного значения происходит перемещение регулирующего органа пропорционально величине этого отклонения (*statos* -стоящий). Чем больше ошибка, тем больше управляющее воздействие и значению величины на входе регулятора соответствует только одно определенное положение регулирующего органа.

Пропорциональная зависимость достигается за счет действия жесткой обратной связи, поэтому П-регуляторы называются также регуляторами с жесткой обратной связью. Скорость перемещения регулирующего органа таких регуляторов пропорциональна скорости изменения регулируемой величины.

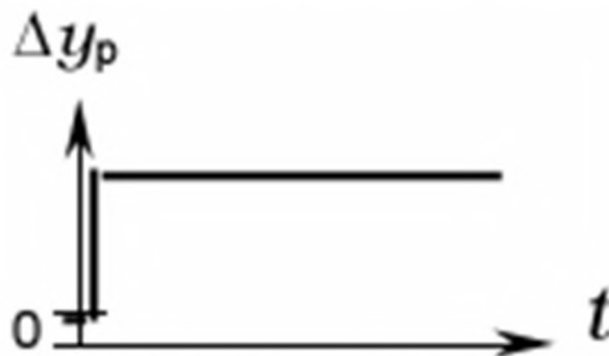


Рис. 4 Кривая разгона П-регулятора

Алгоритм регулирования П-регулятора:



$$\Delta y_p = K_p \cdot x_p \quad (2)$$

$K_p$  – коэффициент передачи

$\Delta y_p$  – перемещение регулирующего органа

Пропорциональные регуляторы могут применяться для управления процессами, протекающими в объектах, как обладающих, так и не обладающих самовыравниванием. При этом нужно иметь в виду, что изменения нагрузки должны быть невелики, чтобы статическая ошибка оставалась в допустимых пределах.

Такие регуляторы применяются в любых объектах, например, в системах вентиляции для поддержания требуемого температурного режима в помещении и могут включать в себя таймер и дистанционное управление, также в системах регулирования давления в трубопроводе. Они имеют максимальное быстродействие. Недостаток – это наличие статической ошибки.

### ИНТЕГРИРУЮЩИЙ РЕГУЛЯТОР (И-регулятор)

*Интегральными, или астатическими* называют автоматические регуляторы, у которых одному и тому же значению величины на входе регулятора могут соответствовать различные положения регулирующего органа (*astatos* – неустойчивый, беспокойный).

Скорость перемещения регулирующего органа этих регуляторов, тем больше, чем больше отклонение регулируемой величины от заданного значения, управляющее воздействие пропорционально интегралу от ошибки (рассогласования).

Полное перемещение регулирующего органа И-регулятора:

$$\Delta y_p = K_p \int_0^t x_p dt \quad (3)$$

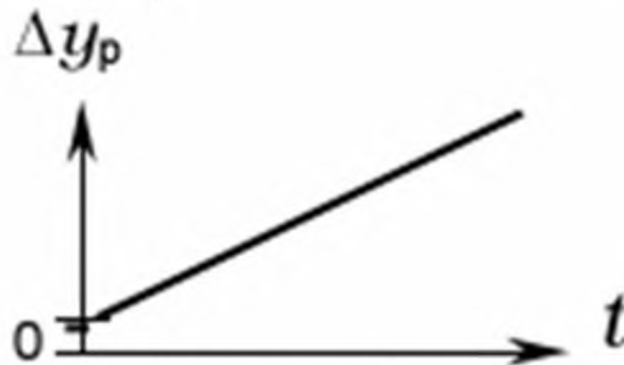


Рис. 5 Кривая разгона И-регулятора

В И-регуляторах перемещение регулирующего органа таково, что ликвидируется статическая ошибка, в отличие от П-регуляторов.

Свойства идеального П-регулятора аналогичны свойствам статического объекта, не обладающего инерцией ( $T=0$ ), тогда как И-регулятор по своей характеристике повторяет свойства астатического объекта первого порядка.

И-регулятор имеет высокую точность регулирования. Применяется на любых статических объектах. Недостаток - не возможно применять на астатических объектах. И-регулятор применяется только в системах с самовыравниванием, в противном случае система будет неустойчивой.

### ПРОПОРЦИОНАЛЬНО – ИНТЕГРАЛЬНЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ (ПИ-регуляторы)

Сравнение П-регуляторов и И-регуляторов показывает, что первые обладают преимуществом по динамическим свойствам и обеспечивают лучший переходный процесс регулирования (выше быстродействие); преимущество вторых – отсутствие статической ошибки (выше точность регулирования)

ПИ – регулятор совмещает оба П- и И- регуляторы

ПИ – регулятор - изодромный (от греческого *isos* - равный, подобный; *dromos*- бегущий).

При отклонении регулируемой величины от заданного значения он пропорционально переместит регулирующий орган как П-регулятор. Затем продолжит перемещение регулирующего органа до исчезновения статической ошибки, т.е. приведет регулируемую величину к заданному значению аналогично И-регулятору.

ПИ-регуляторы являются регуляторами косвенного действия. Они могут применяться на любых объектах и обеспечивают высокую точность выполнения задания.

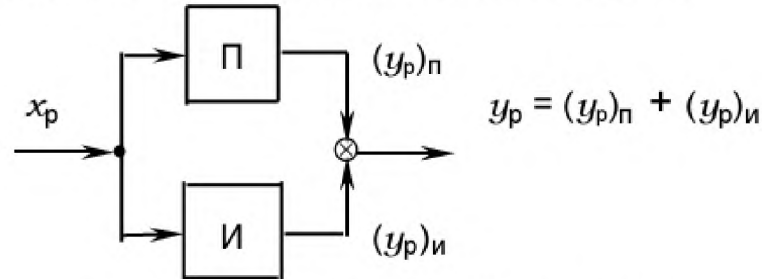


Рис. 6 Структурная схема ПИ-регулятора

Закон ПИ-регулирования:

$$\Delta y_p = K_p \cdot x_p + \frac{1}{T_I} \int_0^t x_p dt \quad (4)$$

Где  $T_I = \frac{T_y}{K_p}$  - условная постоянная времени интегрирования.

$T_y$  – время удвоения - за это время полное перемещение регулирующего органа  $\Delta U_p$  удваивается, по сравнению с тем, которое совершает только один - пропорциональный компонент регулятора  $(U_p)_п$ .

Постоянная времени интегрирования в И-регуляторе равна времени, в течение которого с момента поступления на вход регулятора постоянного сигнала выходной сигнал регулятора достигнет значения, равного значению входного сигнала.

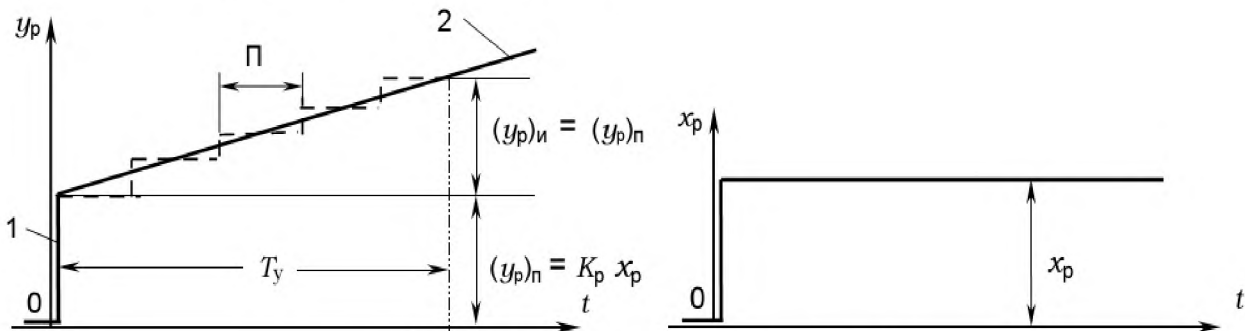


Рис. 7 Кривая разгона ПИ - регулятора:

1 - пропорциональный и 2 интегральный компоненты,

Практически встречаются промышленные образцы автоматических регуляторов, которые используют не только непрерывный, но и импульсный режим действия.

В непрерывном режиме обычно работает пропорциональная компонента регулятора, так как требуется обеспечить максимально возможную скорость исполнительного механизма. Импульсный же режим оказывается удобным для настройки требуемой средней скорости исполнительного механизма путем включения его отдельными импульсами, следующими друг за другом с периодом  $\Pi$ . Величина  $\Pi$  оказывается в таком случае дополнительным параметром настройки, использование которого оказывается целесообразным для компенсации запаздывания объекта

## ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ

В состав линейных регуляторов может быть введен блок дополнительного (дифференцирующего - Д) воздействия на объект по первой производной его выхода. Это позволяет быстрее приводить выход объекта к его заданному значению, по сравнению с тем, когда регулятор чувствителен только к сигналу  $x_p$ . В результате реализуются пропорционально-дифференциальные (ПД-) и пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД-) законы регулирования. Однако они эффективны лишь для малоинерционных объектов, то есть объектов с малой постоянной времени и, следовательно, высокой скоростью изменения выхода.

Такие регуляторы целесообразно применять в тех случаях, когда нагрузка объектов регулирования изменяется часто и быстро, а запаздывания велики.

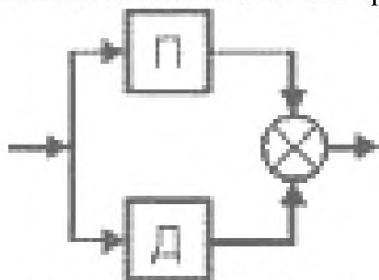


Рис. 8 Структурная схема ПД-регулятора

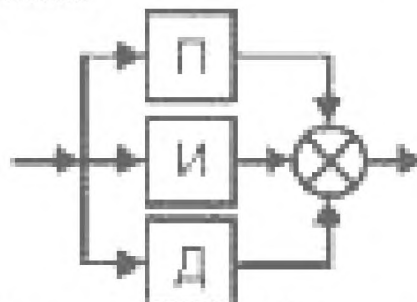


Рис. 9 Структурная схема ПИД-регулятора

Закон ПД-регулирования:

$$\Delta y_p = K_p + T_{\Pi} \frac{dx_p}{dt} \quad (5)$$

Закон ПИД-регулирования:

$$\Delta y_p = K_p \left( x_p + \frac{1}{T_v} \int x_p dt + T_{\Pi} \frac{dx_p}{dt} \right) \quad (6)$$

$T_{\Pi}$  - временем предварения - постоянная времени дифференцирующего устройства, подающего на вход регулирующего устройства импульс, пропорциональный скорости изменения регулируемой величины, называется