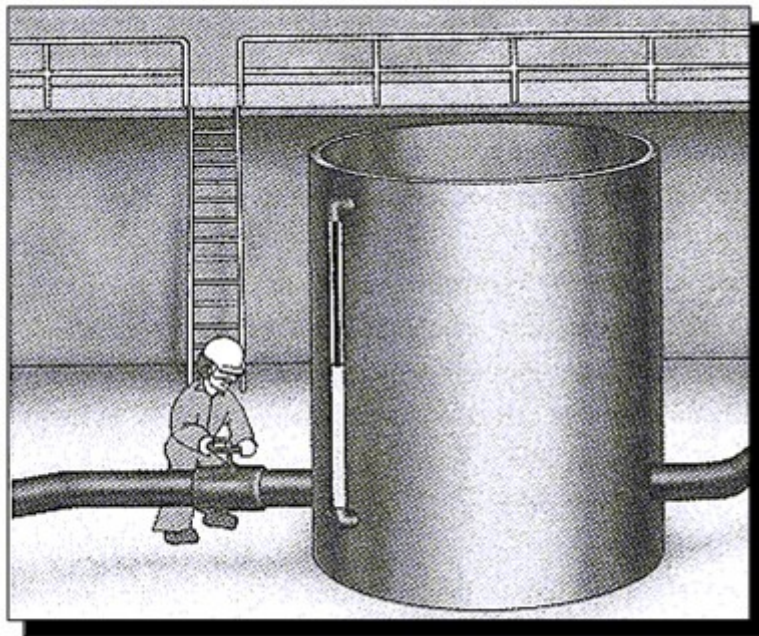


Законы регулирования

Закон регулирования — это зависимость перемещения регулирующего органа от отклонения регулируемой переменной. Качество регулирования обеспечивается выбором закона регулирования. Наибольшее распространение получили следующие пять основных законов регулирования: **двухпозиционный, пропорциональный, интегральный, дифференциальный и пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД).**



Система ручного регулирования уровня

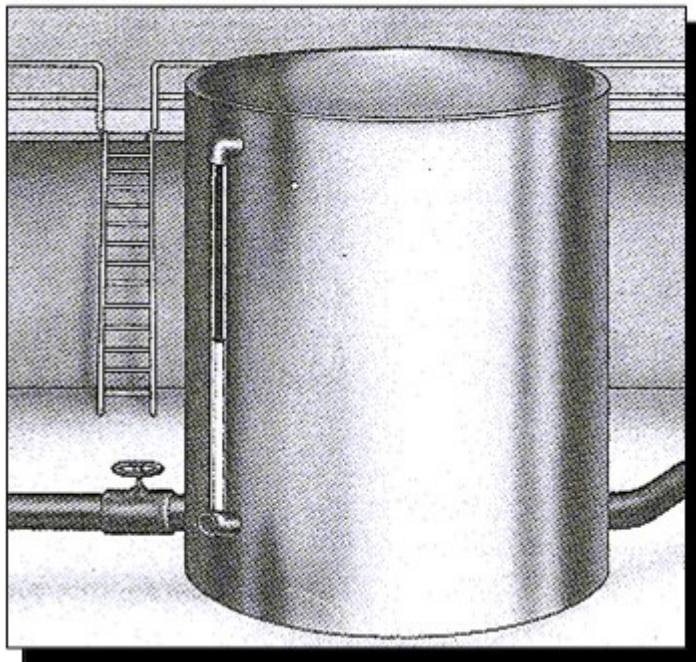
Двухпозиционный закон регулирования — это «Двухпозиционное регулирование», которое называют еще «Старт-стопное регулирование». Чтобы моделировать двухпозиционный режим регулирования, оператор на рисунке выше устанавливал бы регулирующий клапан в одно из двух крайних положений: или полностью открыт, или полностью закрыт, то есть «включено» или «выключено». Так, например, если уровень будет низким, оператор откроет клапан полностью, чтобы вода могла наполнить резервуар. Затем, как только вода достигнет желаемого уровня, оператор полностью закроет клапан, чтобы прекратить приток воды в резервуар.

Чтобы моделировать **пропорциональный закон регулирования**, оператор непрерывно устанавливал бы регулирующий клапан в положение, отвечающее произошедшему на данный момент изменению уровня. Так, например, если уровень понизился немного, оператор откроет клапан немного; если уровень понизился еще больше, оператор увеличит степень открытия клапана. Наоборот, если уровень несколько повысится, оператор уменьшит степень открытия клапана на соответствующую величину. Таким образом, моделируя пропорциональное регулирование, оператор непрерывно в соответствии с изменением уровня изменяет положение клапана. Регулирование уровня при этом будет выполняться более эффективно, чем при простом открытии и закрытии клапана. Когда изменения уровня прекращаются, оператор прекращает позиционирование клапана.

Так как при пропорциональном регулировании выходной корректирующий сигнал вырабатывается на изменения регулируемой переменной процесса, пропорциональный регулятор не дает выходного управляющего сигнала, если регулируемая переменная процесса не изменяется. Например, когда уровень в резервуаре изменяется, оператор открывает или закрывает клапан пропорционально этим изменениям. Когда изменения уровня прекращаются, оператор останавливает позиционирование клапана. При этом

уровень установится на некоторой отметке, но это может не быть заданное значение уровня. Это означает, что при пропорциональном регулировании может быть смещение регулируемой переменной процесса или ошибка регулирования. В определенных системах это вполне приемлемо. Если же смещение регулируемой переменной не допускается, надо применить другой закон регулирования: интегральный, при котором обеспечивается возвращение регулируемой переменной к уставке.

Чтобы моделировать **закон интегрального регулирования**, оператор продолжает открывать или закрывать клапан так долго пока уровень отклоняется от уставки в независимости от того происходят ли при этом произвольные изменения уровня или не происходят. Так, например, если уровень немного понизился, оператор приоткрывает клапан немного. Затем, даже если уровень перестал изменяться, оператор продолжит открывать клапан пока уровень не возвратится к заданному значению (уставке).



Система регулирования уровня с большой емкостью

Рисунок выше иллюстрирует процесс, который может требовать применения другого закона регулирования. Этот процесс — тот же самый процесс поддержания уровня из первого примера, отличающийся лишь тем, что емкость резервуара много больше, в то время как питательная труба остается той же самой. Это означает, что, когда оператор открывает или закрывает клапан как прежде, оказывается меньшее непосредственное влияние на уровень в резервуаре. При увеличении уровня, пропорциональное регулирование могло бы отработать воздействия, направленные на снижение уровня, но действие не было бы достаточно быстрым, чтобы поддерживать уровень внутри желательных ограничений.

Закон дифференциального регулирования используется, чтобы предотвратить чрезмерное отклонение регулируемой переменной от уставки, вырабатывая корректирующее воздействие пропорциональное скорости отклонения. Так, моделируя дифференциальный закон регулирования, оператор изменяет степень открытия регулирующего клапана в соответствии со скоростью возрастания отклонения уровня от уставки. Например, если уровень начал понижаться, оператор быстро увеличит степень открытия приточного клапана (при чем эти изменения положения клапана большие, чем при чисто пропорциональном законе регулирования), чтобы замедлить скорость изменения уровня и, в конечном счете, стабилизировать уровень. Если уровень начал быстро понижаться, оператор должен быстро и значительно открыть клапан, чтобы замедлить скорость падения уровня и потом его стабилизировать.

Последним мы рассмотрим **пропорционально-интегрально-дифференциальный закон регулирования**. Чтобы воспроизвести этот закон регулирования, оператор изменяет положение регулирующего клапана в зависимости от величины отклонения, скорости изменения и продолжительности рассогласования. Другими словами, оператор в этом случае объединяет пропорциональный, интегральный и дифференциальный законы регулирования.

Пропорциональный закон. Чаще всего такой функциональной зависимостью является простая пропорциональная зависимость, при которой регулируемая величина $y(t)$ должна воспроизводить обычно на более высоком уровне мощности изменения заданной величины $x(t)$ или рассогласования $Dx(t)$.



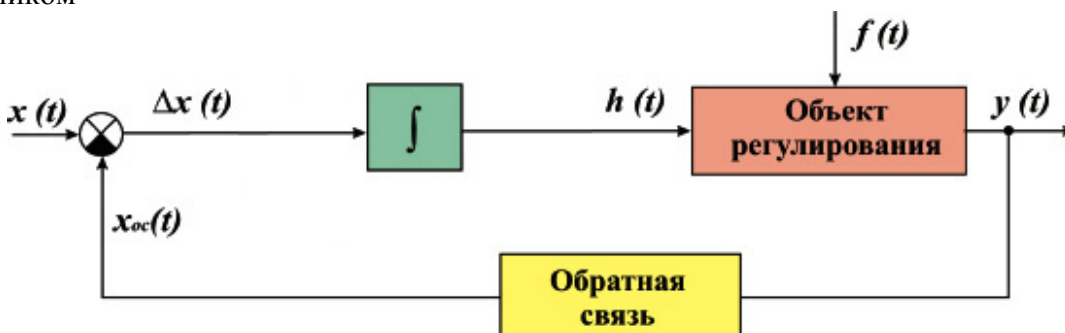
Рисунок

Если считать, что $h(t)$ изменяется пропорционально $Dx(t)$, то такой регулятор называют пропорциональным или П-регулятором. Выражение пропорциональной зависимости между величинами $h(t)$ и $Dx(t)$ имеет следующий вид $h(t) = k Dx(t)$, где k - коэффициент усиления регулятора.

Пропорциональным автоматическим регулятором может служить обычное усилительное звено с изменяемым коэффициентом усиления, включенное в отрицательную обратную связь по отношению к объекту регулирования.

Для повышения точности поддержания заданного значения регулируемой величины, как следует из приведенного уравнения, увеличивают коэффициент усиления k . Однако при этом может возрасти динамическая погрешность, так как даже малое изменение регулируемой величины приводит к значительному изменению управляющего воздействия $h(t)$, что может неблагоприятно сказаться на характеристиках переходных процессов, вызывая дополнительные колебания регулируемой величины.

Интегральный закон. С тем, чтобы исключить указанный недостаток систем автоматического регулирования прямого действия, были созданы автоматические системы непрямого действия, в которых между чувствительным элементом и исполнительным органом включается дополнительное звено (в большинстве случаев выполняющее операцию интегрирования погрешности регулирования $Dx(t)$), работающее с независимым источником



Рисунок

энергии). Это может быть гидравлический или пневматический сервомотор, электродвигатель постоянного или переменного тока и т. п. В интегральных регуляторах (И-регуляторах) управляющее воздействие формируется по следующему закону

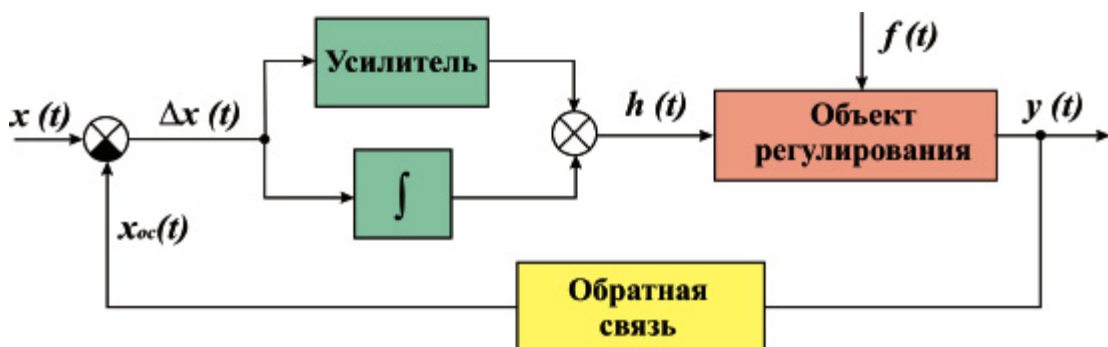
$$h(t) = k \int_0^{\infty} \Delta x(t) dt$$

Интегральным регулятором может служить интегрирующее звено с переменным передаточным коэффициентом в обратной связи.

Принцип работы интегрального регулятора

Переходный процесс в автоматической системе с И-регулятором характеризуется отсутствием статической ошибки регулирования и наибольшим значением отклонения регулируемой величины от установившегося значения по сравнению с другими законами регулирования. И-регуляторы в практике автоматического регулирования не применяются, т. к. они обладают плохими динамическими качествами и в большинстве случаев способствуют возникновению в автоматической системе незатухающих колебаний.

Пропорционально-интегральный закон. Инженеры и ученые давно поняли, что статическая автоматическая система не может быть абсолютно точной, если иметь в виду сведение к нулю статической ошибки, а интегральные регуляторы способствуют возникновению колебательных режимов. Тогда начались поиски способов улучшения работы автоматических систем. Было замечено, что отрицательное влияние на динамические свойства автоматической системы оказывают инерционные элементы, особенно в регуляторах прямого действия.



Рисунок

В процессе регулирования пропорционально-интегральной автоматической системы (ПИ-регуляторы) осуществляется два действия: одно, характерное для П-регулятора, следовательно, можно говорить о П-составляющей процесса регулирования, и второе, осуществляющее интегрирование величины рассогласования $\Delta x(t)$ интегральная составляющая.

В ПИ-регуляторах регулирующее воздействие формируется по следующему закону.

$$h(t) = k_1 \Delta x(t) + k_2 \int_0^{\infty} \Delta x(t) dt$$

Пропорционально-интегральный закон регулирования представляет собой параллельное соединение пропорциональной и интегральной составляющих.

Пропорционально-интегральный регулятор сочетает в себе достоинства пропорциональных и интегральных законов автоматического регулирования, а именно: пропорциональная составляющая обеспечивает достаточное быстродействие регулятора, а интегральная составляющая ликвидирует статическую ошибку регулирования.

В начале процесса автоматического регулирования основную роль играет пропорциональная составляющая, так как интегральная составляющая зависит не только от абсолютного значения рассогласования между заданным и фактическим значением регулируемой величины, но и от времени. С увеличением времени возрастает роль интегральной составляющей, обеспечивающей устранение статической ошибки.

Астатические системы могут быть первого, второго и более высокого порядка астатизма.

Астатическая система первого порядка не имеет ошибки по положению, однако имеют постоянную ошибку по скорости и возрастающую ошибку по ускорению. Астатическая система второго порядка не имеет ошибок по положению и по скорости, однако имеют постоянную ошибку по ускорению.

Автоматическая система будет астатической по отношению к управляемому воздействию, если при внешнем воздействии, стремящемся к установившемуся значению, ошибка стремится к нулю независимо от значения внешнего воздействия. Статические системы обычно имеют менее сложное конструктивное решение, чем астатические. Они обладают погрешностью в поддержании постоянства значения регулируемой величины при разных внешних нагрузках. Изменение регулируемой величины, которое вызывает у статической системы перемещение управляемого органа из одного предельного положения в другое, является важнейшей характеристикой статической системы и называется его неравномерностью. Отношение этой неравномерности к номинальному значению регулируемой величины называют степенью неравномерности (коэффициентом статизма или статизмом).

Если иметь в виду отсутствие статической погрешности регулирования, то такая автоматическая система является абсолютно точной. Но, как показал опыт, при такой схеме построения автоматической системы трудно получить удовлетворительные динамические качества регулирования. Это обусловлено тем, что к положению нового равновесного состояния рассогласование $Dx(t)$ должно приближаться с нулевой скоростью. Иначе в автоматической системе возникают незатухающие колебания регулируемой величины. В общем возможности применения таких автоматических систем весьма ограничены.

В любом автоматическом регуляторе имеется внутренняя обратная связь, благодаря которой золотник принудительно возвращается в положение перекрыши, т. е. в равновесное состояние. Такой регулятор обеспечивает хорошие динамические свойства, но при его использовании возникает статическая ошибка регулирования.

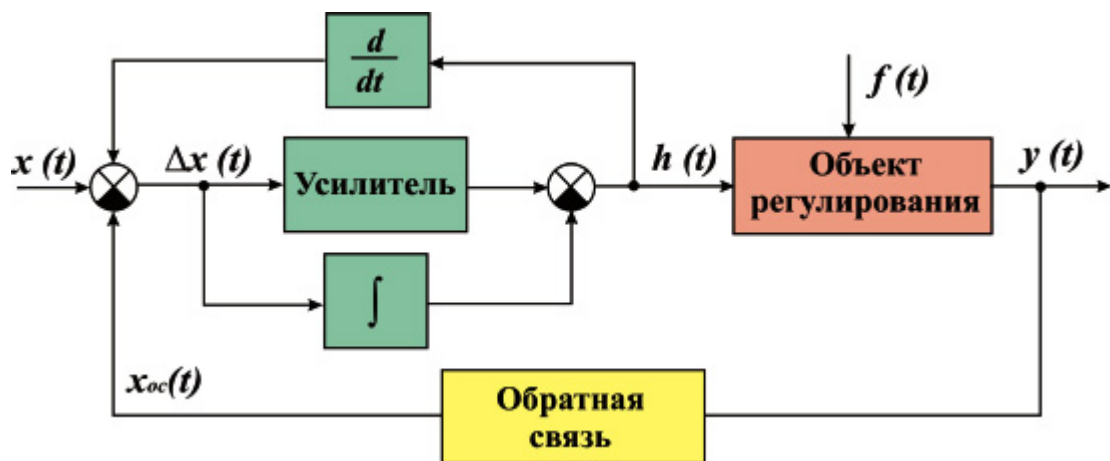
Астатическая система первого порядка имеет один интегратор в прямой цепи регулирования. После завершения переходного процесса точность регулирования обеспечивается благодаря свойствам интегратора как запоминающего устройства (память идеального интегратора бесконечна).

Введение в автоматическую систему двух интегрирующих звеньев позволяет получить управление по ускорению. Система с астатизмом второго порядка благодаря свойству интеграторов точно воспроизводит и установившемся процессе постоянные и линейно возрастающие воздействия. Воздействие, изменяющееся с постоянным ускорением, автоматическая система воспроизводит (копирует) с постоянной динамической ошибкой, называемой ошибкой по ускорению.

Таким образом, порядок астатизма по отношению к задающему воздействию легко определить непосредственно по функциональной схеме автоматической системы. Для

этого автоматическую систему путем структурных преобразований следует привести к одноконтурной и определить количество интегрирующих звеньев между входом и выходом.

Пропорционально-интегрально-дифференциальный закон. Положительные качества всех рассмотренных автоматических систем объединяет пропорционально-интегрально-дифференциальный закон регулирования или ПИД-регуляторы. Мысль инженеров работала над тем, как устранить отмеченные выше недостатки, или если их полностью устранить нельзя, то хотя бы уменьшить их вредное влияние на процесс регулирования. Было решено использовать воздействия по производной сигнала рассогласования.



Рисунок

ПИД-регулятор сочетает в себе достоинства всех простейших законов автоматического регулирования:

- высокое быстродействие благодаря наличию пропорциональной составляющей;
- высокую точность благодаря интегральной составляющей;
- малое время переходного процесса благодаря дифференциальной составляющей.

Иногда говорят, что такие регуляторы работают с предварением, т. е. он вступает в действие тогда, когда еще отклонение не произошло.

Благодаря воздействию по производной осуществляется предварение формирования управляющего воздействия, а благодаря сигналу по интегралу снимается статическая погрешность регулирования.

В этом случае управляющее воздействие формируется согласно закону

$$h(t) = k_1 \Delta x(t) + k_2 \int_0^{\infty} \Delta x(t) dt \pm k_3 \frac{d \Delta x(t)}{dt}$$

На установившихся режимах работы всегда, как бы ни изменялись возмущения, регулируемая величина остается неизменной. Этот регулятор в начале переходного процесса, вызванном изменением нагрузки, работает как ПИ-регулятор, что является благоприятным для динамических свойств системы, а затем в ходе переходного процесса, действие обратной связи ослабевает, что позволяет работать без статической погрешности. Такая обратная связь называется гибкой обратной связью.

Принцип работы пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора

Необходимо отметить, что применение автоматических регуляторов с дифференциальными составляющими, несмотря на их достоинства, не всегда

целесообразно, а иногда и недопустимо. Так, для объектов с большим запаздыванием по каналу регулирования бесполезно вводить воздействие по производной от регулируемой величины, так как этот сигнал будет поступать в автоматический регулятор по истечении времени запаздывания после прихода возмущения, за которые в объекте регулирования могут накопиться большие отклонения. В таких случаях ПИД-регулятор может привести к неустойчивости автоматической системы

Использование нелинейных законов автоматического регулирования, определяемых разнообразными нелинейными уравнениями состояния значительно расширяет возможности целесообразного изменения качества процессов автоматического регулирования и точности работы автоматических систем. Это должно быть ясно из общих принципиальных соображений, так как область нелинейных уравнений значительно богаче и разнообразнее, чем линейных.

Несмотря на то, что общей теории нелинейных законов автоматического регулирования нет, исследования и опыт применения отдельных частных видов этих законов говорят об их большой практической эффективности.

Важным отличием нелинейных законов автоматического регулирования от линейных является то, что они придают автоматической системе принципиально новые свойства. Если при линейном законе автоматического регулирования всегда вырабатывается сигнал, пропорциональный входной переменной или ее производной, то при нелинейном законе может существенно изменяться сам характер действия автоматической системы на объект регулирования в зависимости от величины входного воздействия. Другими словами, если для линейных автоматических систем изменение размера отклонения $Dx(t)$ - это изменение только масштаба, но не формы процессов, то в нелинейной автоматической системе при этом может существенно изменяться и форма процессов, вплоть до принципиальных качественных изменений картины происходящих процессов. Эти особые свойства нелинейных законов можно выгодно использовать в технике автоматического регулирования.