

Законы регулирования

Цель лекции: рассмотреть
двухпозиционный закон, ПИ закон,
ПИД закон и П законы
регулирования

Программа регулирования

- План формирования задающего воздействия $g(t)$ на систему.
- временной: $y=y(t)$;
- параметрический: $y=y(s_1,s_2,s_3,\dots,s_n)$.

Законы регулирования

- Линейные непрерывные.
- Нелинейные.

Классификация нелинейных законов регулирования

- Функциональные.

- Логические.

Если $|x| < 0.2Gm$, тогда $u = k_1x$;

Если $|x| > 0.2Gm$, тогда $u = k_2x$;

где: $k_1 < k_2$

- Параметрические.

$$u = k(t[^\circ\text{C}]; h[\text{м}]; G[\text{кг}])x.$$

- Оптимизирующие.

$$u = k(\min(\text{CO}_2); \max(\text{КПД}))x.$$

Линейные законы регулирования

Закон регулирования — называется математическое выражение, описывающее зависимость между входом автоматического регулятора $Dx(t) = x(t) - x_{ос}(t)$ и его выходом $y(t)$. Качество регулирования обеспечивается выбором закона регулирования. Наибольшее распространение получили следующие пять основных законов регулирования:

- двухпозиционный - РЕЛЕЙНЫЙ,
- пропорциональный - П,
- интегральный - И,
- дифференциальный – Д,
- пропорционально – интегрально -дифференциальный - ПИД.



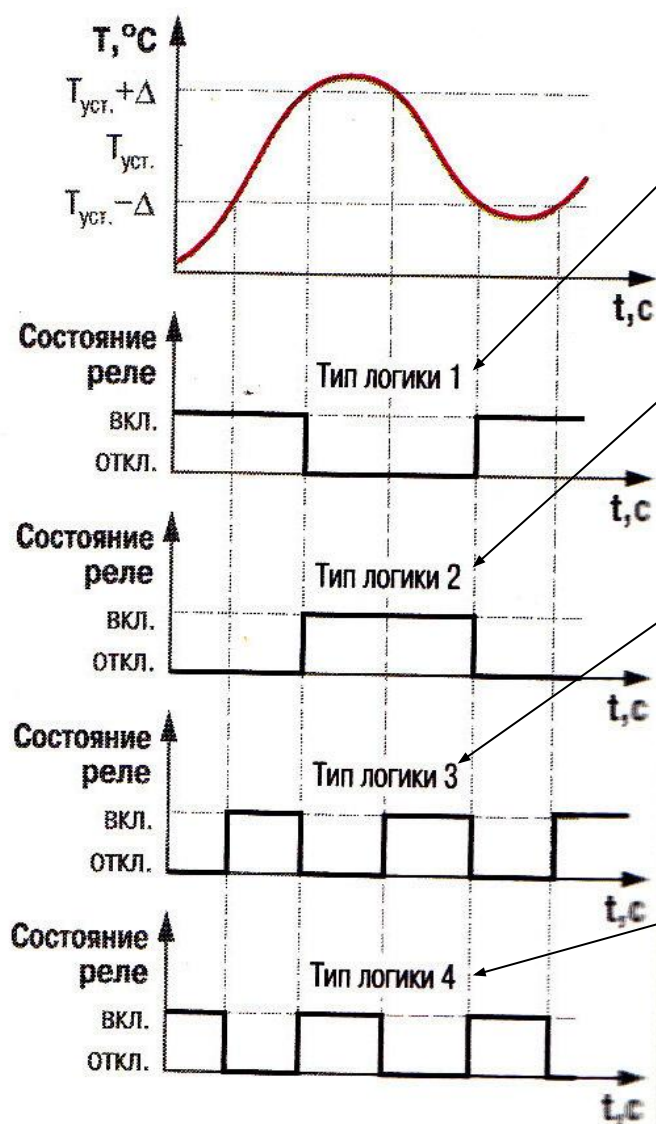
Двухпозиционный регулятор

- В режиме двухпозиционного регулятора логическое устройство (компаратор) сравнивает значение входной величины с заданием и выдает управляющий сигнал на входное устройство в соответствии с заданной логикой.
- Выходной сигнал двухпозиционного регулятора имеет только два значения: ВКЛ. и ВЫКЛ.
- Тип логики, уставка Туст. Или задание, гистерезис – задаются пользователем при программировании.

Применение двухпозиционного регулятора

- Для регулирования измеряемой величины в несложных системах, когда не требуется точности поддержания регулируемой величины.
- Для сигнализации о выходе контролируемой величины за заданные пределы.

Разновидности двухпозиционного закона регулирования



Тип логики 1 – применяется для управления работой нагревателя или сигнализации.
Название - *прямой гистерезис*. При $T < T_{\text{уст.}} - \Delta$ устройство включается $T > T_{\text{уст.}} + \Delta$ - выключается.

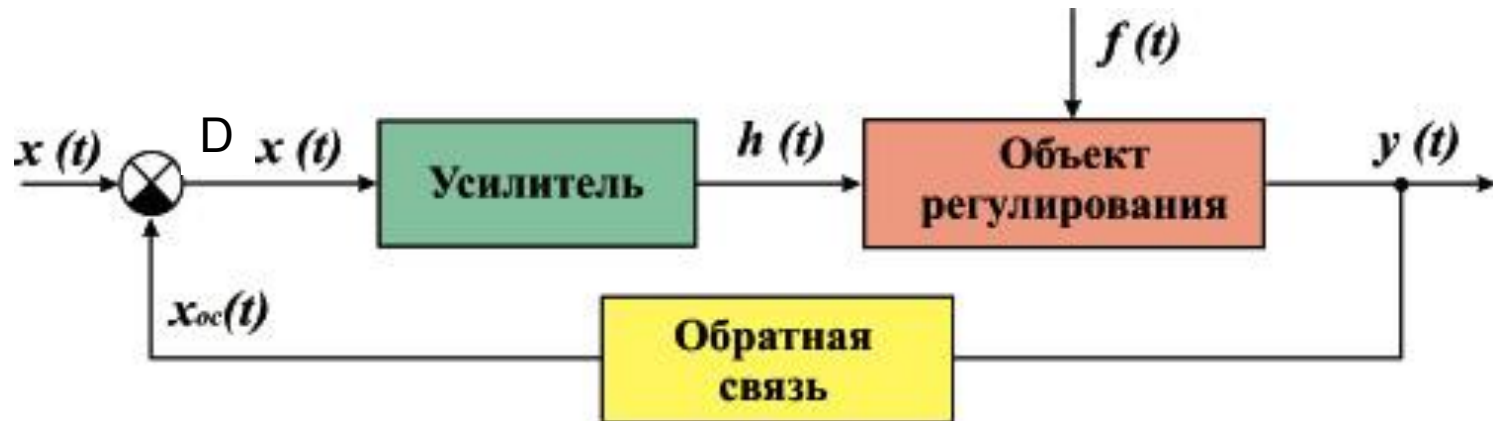
Тип логики 2 – применяется для управления холодильником, вентилятором.
Название - *обратный гистерезис*. Инверсия Логике 1.

Тип логики 3 – применяется для сигнализации о выходе контролируемого параметра за заданные границы задания.
Название – *П – образная*. При $T_{\text{уст.}} - \Delta < T < T_{\text{уст.}} + \Delta$

Тип логики 4 – применяется для сигнализации о выходе контролируемого параметра за заданные границы задания.
Название – *U – образная*.

Пропорциональный закон регулирования или П - 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 $Dx(t)$.



Выражение пропорциональной зависимости между величинами $h(t)$ и $Dx(t)$ имеет следующий вид $h(t) = k Dx(t)$, где k - коэффициент усиления регулятора.

Свойства системы с П - регулятором

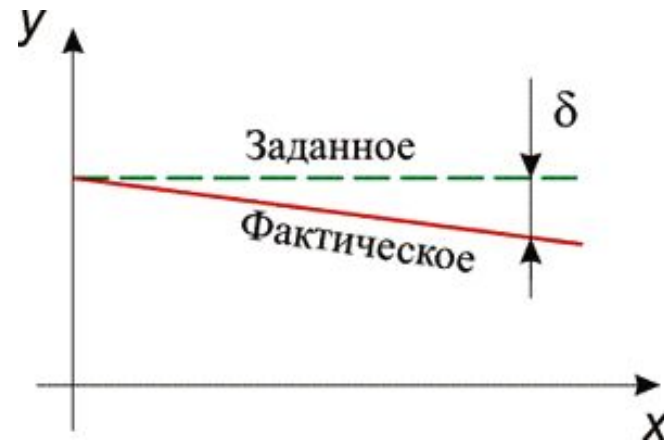
- Достоинство – отсутствие инерционности: реакция П - регулятора на изменение входной переменной формируется без задержки.
- Поэтому П - регулятор обеспечивает хорошее быстродействие и относительно невысокий уровень максимальной динамической ошибки.
- Но П - регуляторам свойственно наличие ошибки регулирования в статическом или установившемся состоянии.

Статическая ошибка П - закона

- Как видно из приведенной формулы, нормальное функционирование данного регулятора возможно только в случае, когда $Dx(t) > 0$. Таким образом, автоматическая система имеет постоянную (статическую) ошибку, которую называют статизмом регулятора, а система автоматического регулирования называется статической системой.

Статизм выражается в процентах и определяется по формуле:

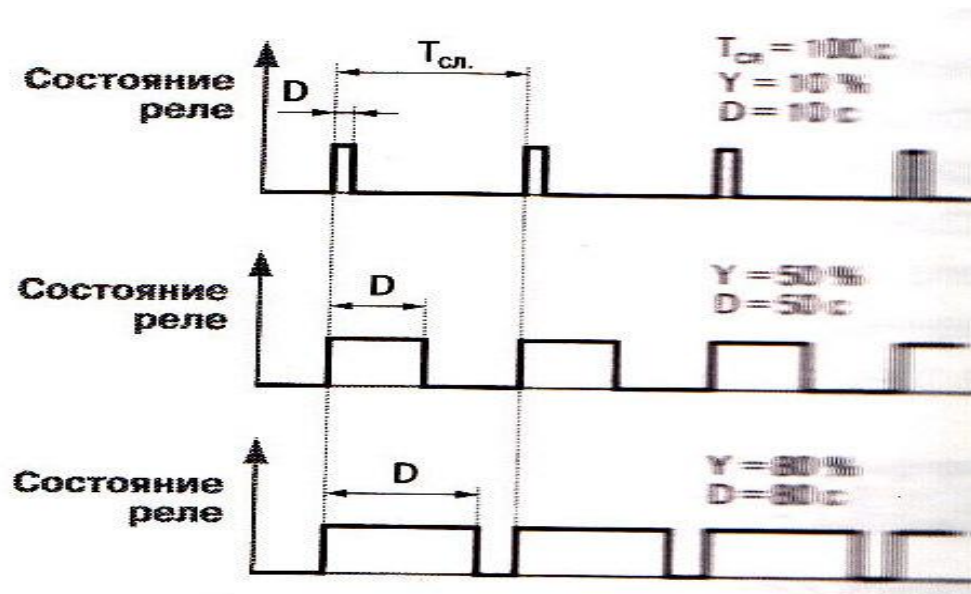
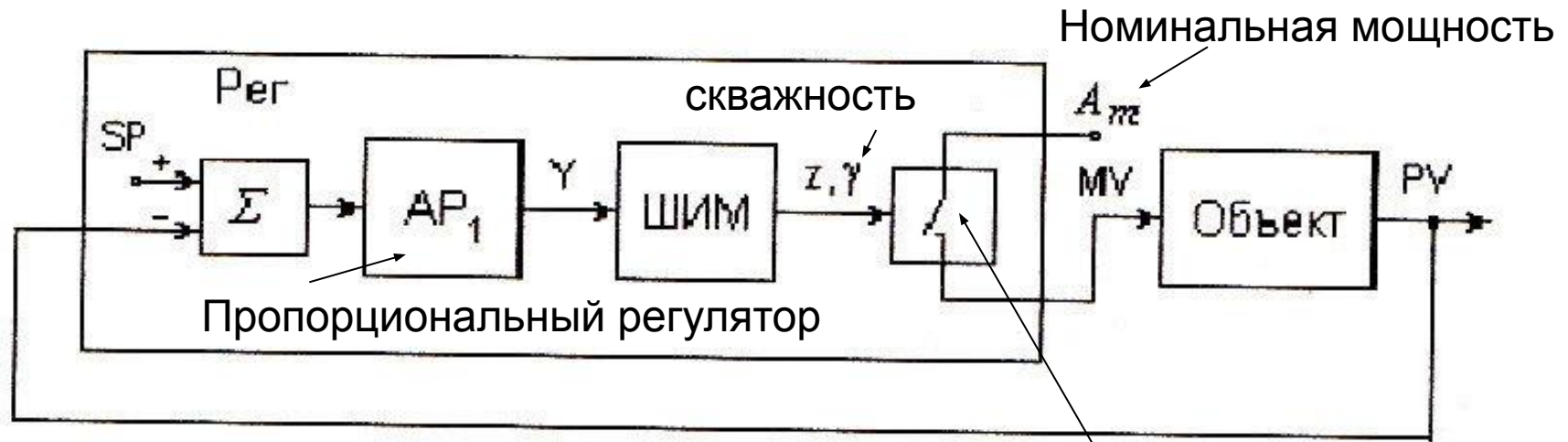
$$\delta = \frac{x(t) - y(t)}{y(t)} 100\%$$



Линейные алгоритмы управления

- Алгоритмы управления для устройств пропорционального типа (например – управление нагревателем электропечи).
- Алгоритмы управления для исполнительных устройств интегрирующего типа (например – исполнительных устройств постоянной скорости) или электроприводов.

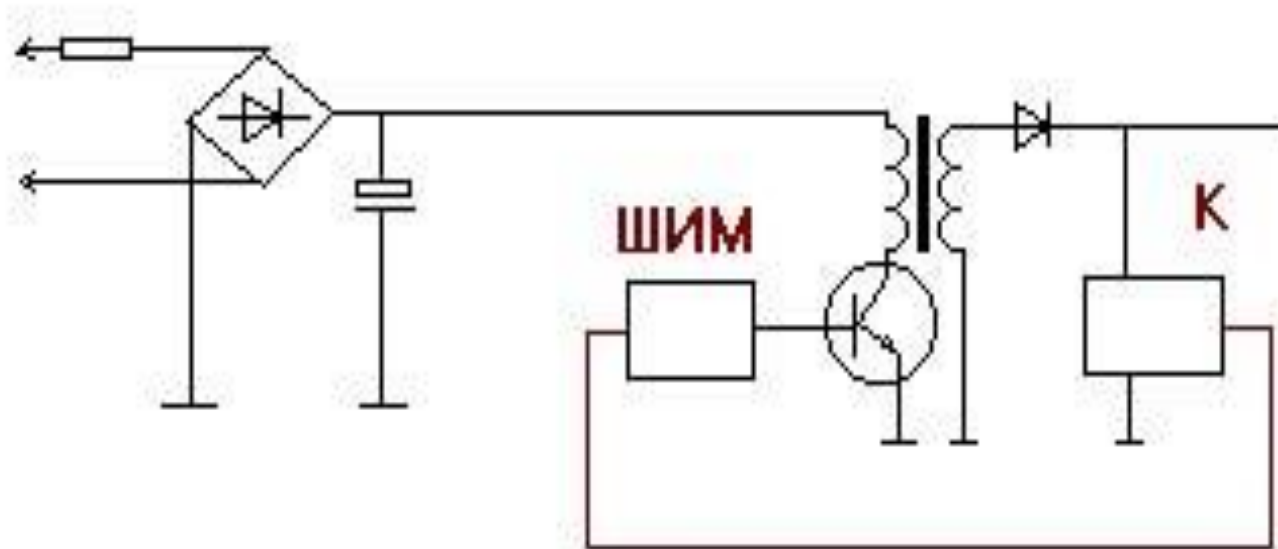
Работа пропорционального регулятора с управлением средней мощностью нагревателя через двухпозиционный шим



Контакт реле подключающий нагреватель

Работа пропорционального регулятора с управлением выходного напряжения стабилизатора через двухпозиционный шим

- Пример задачи стабилизации
выходного напряжения

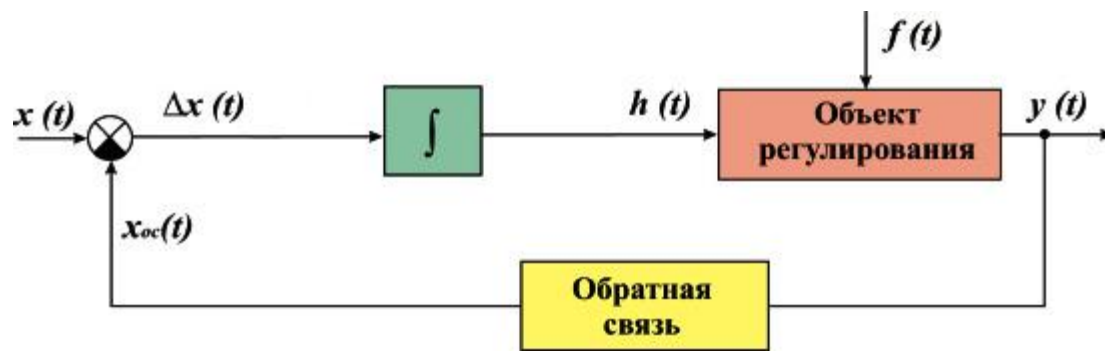


Интегральный закон регулирования или И - закон

- Или интегральное звено СУ. Регулятор вырабатывает сигнал ($MV(t)$), пропорциональный интегралу от ошибки регулирования ($e(t)$)

$$MV(t) = MV(0) + \frac{Kr}{Ti} \cdot \int_0^t E(t) \cdot dt$$

Kr : Коэффициент пропорциональности
 $MV(0)$: Начальное значение MV
 Ti : Постоянная времени интегрирования
 $E(t)$: Рассогласование

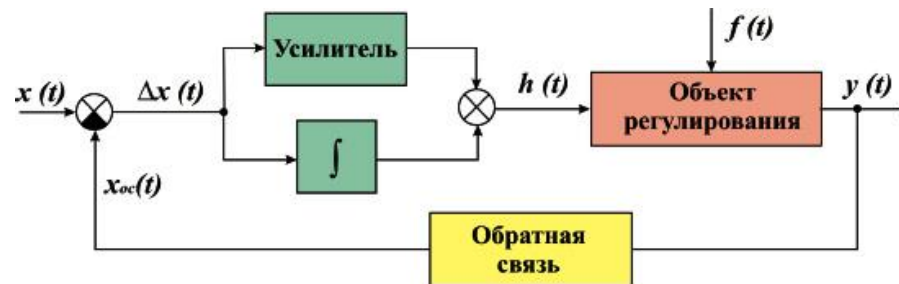


Свойство системы с интегральным регулятором

- Достоинством И - регулятора является отсутствие ошибки регулирования в установившемся режиме. Это связано с тем что регулирующее воздействие $MV(t)$ перестанет изменяться, когда сигнал рассогласования $E=0$.
- Однако система с И - регулятором обладает низким быстродействием. Процесс регулирования характеризуется большой продолжительностью и большим значением максимального динамического отклонения.
- Обычно интегральное звено регулирования самостоятельно не используется. Обычно используется ПИ регулятор.

Пропорционально-интегральный закон регулирования или ПИ-закон

- Пропорционально-интегральное звено СУ. ПИ-регулятор можно рассматривать как два регулятора, соединенные параллельно



$$MV(t) = MV(0) + Kr \cdot \left[E(t) + \frac{1}{Ti} \cdot \int_0^t E(t) \cdot dt \right]$$

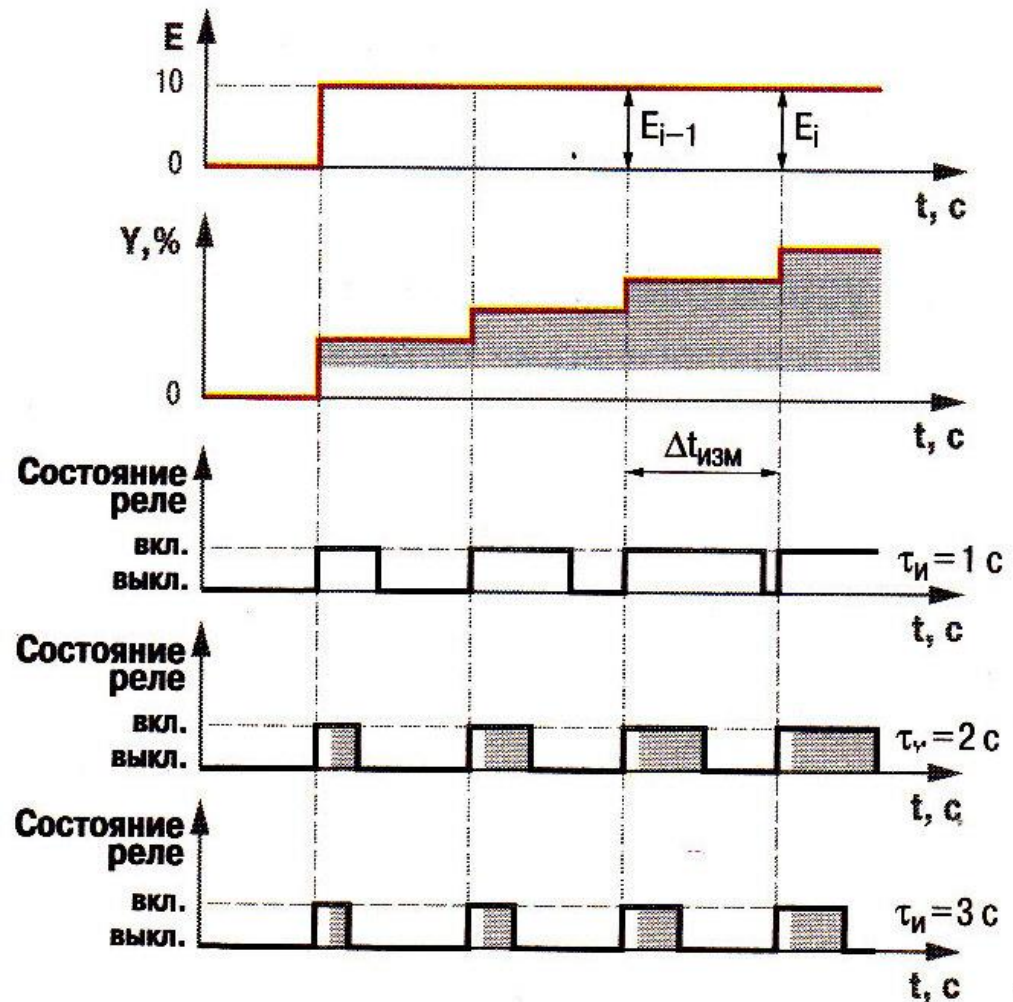
$$u(t) = K_1 \cdot e(t) + K_0 \int_0^t e(t) \cdot dt$$

П - звено

И - звено

Пример работы ПИ -регулятора

- Выходной сигнал ПИ-регулятора и длительность управляющих ШИМ - импульсов при различных значениях длительности импульсов и рассогласовании равном 10.



Свойства системы с ПИ-регулятором

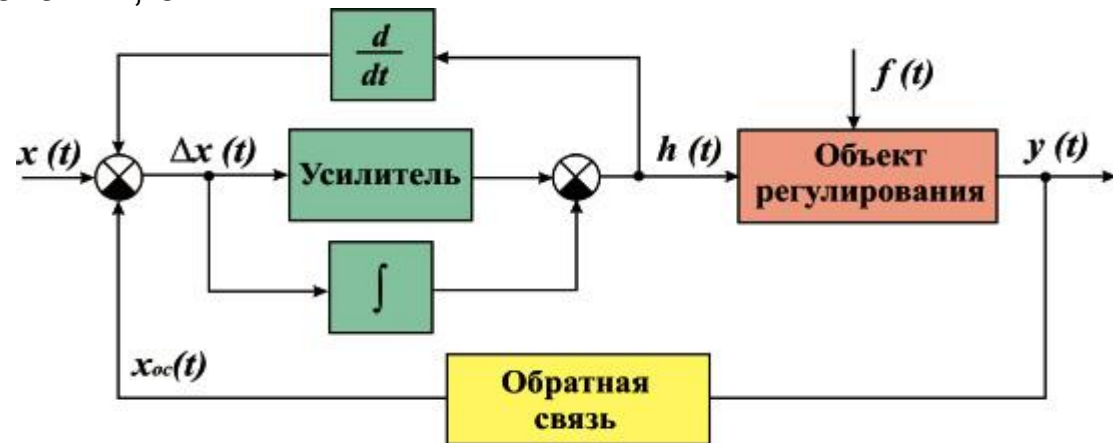
- Применение ПИ закона регулирования позволяет сочетать в одном устройстве положительные свойства П и И регуляторов. А именно П-составляющая обеспечивает быстроедействие системы, а И - составляющая обеспечивает отсутствие статической ошибки как заключительной стадии процесса регулирования.
- Однако при этом необходимо решать задачу рационального соотношения П и И составляющих.
- Недостатком ПИ регулирования является медленная реакция на возмущающие воздействия.

Настройка ПИ регулятора

- Для настройки ПИ регулятора следует сначала установить постоянную времени интегрирования равной нулю, а коэффициент пропорциональности — максимальным.
- Затем как при настройке пропорционального регулятора, уменьшением коэффициента пропорциональности нужно добиться появления в системе незатухающих колебаний. Близкое к оптимальному значение коэффициента пропорциональности будет в два раза больше того, при котором возникли колебания, а близкое к оптимальному значение постоянной времени интегрирования — на 20% меньше периода колебаний.

Классический пропорционально-интегральный-дифференциальный закон регулирования или ПИД-закон

- Для реализации ПИД - закона используются три основные переменные:
 - P – зона пропорциональности, %;
 - I – время интегрирования, с;
 - D – время дифференцирования, с.



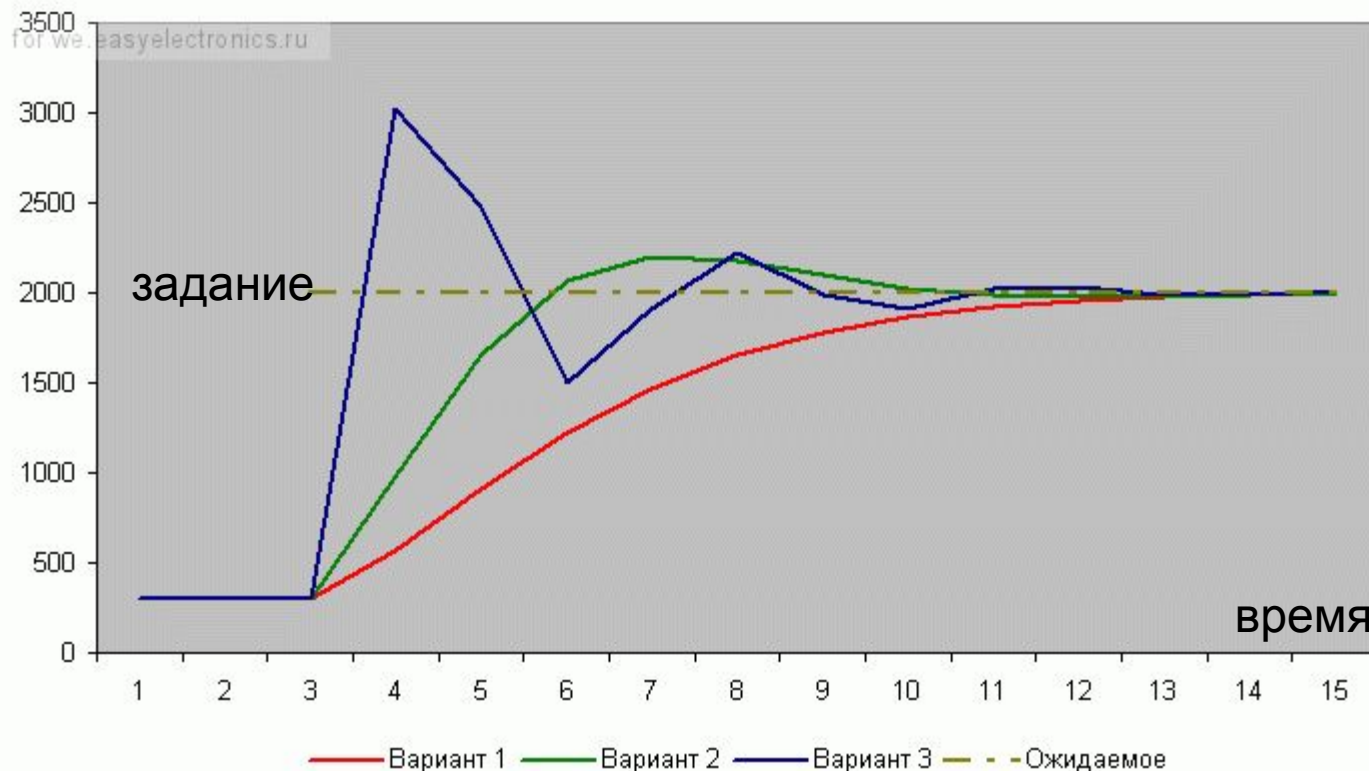
$$MV(t) = MV(0) + Kr \cdot \left[E(t) + \frac{1}{Ti} \cdot \int_0^t E(t) \cdot dt + Td \cdot \frac{dE}{dt} \right]$$

Или так

$$u(t) = P + I + D = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Пропорциональная составляющая ПИД регулятора

- Увеличение коэффициента усиления приводит к появлению незатухающих колебаний выходного сигнала



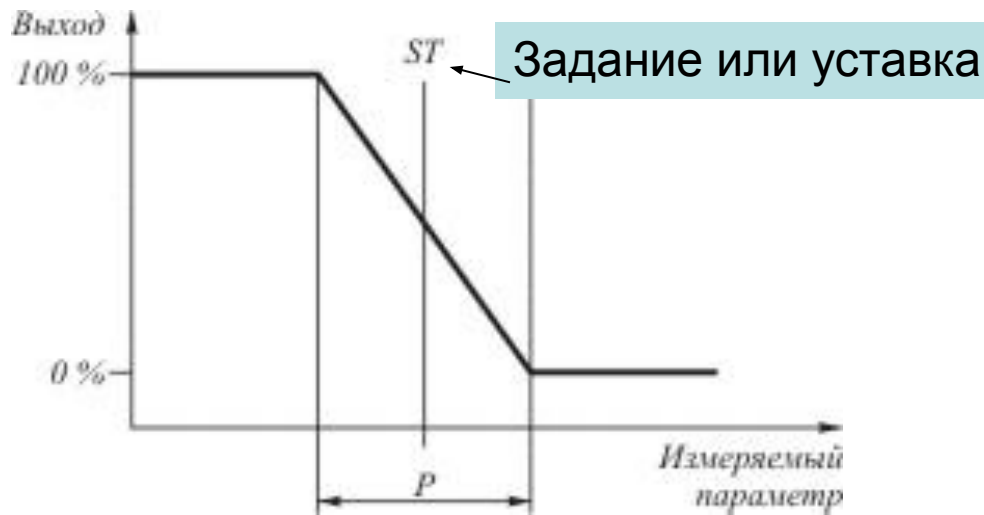
Пропорциональная составляющая

- В зоне пропорциональности, определяемой коэффициентом P , сигнал управления будет изменяться пропорционально разнице между уставкой и действительным значением параметра (рассогласованию):

$$\text{сигнал управления} = 100/P \cdot E,$$

Коэффициент пропорциональности

Рассогласование

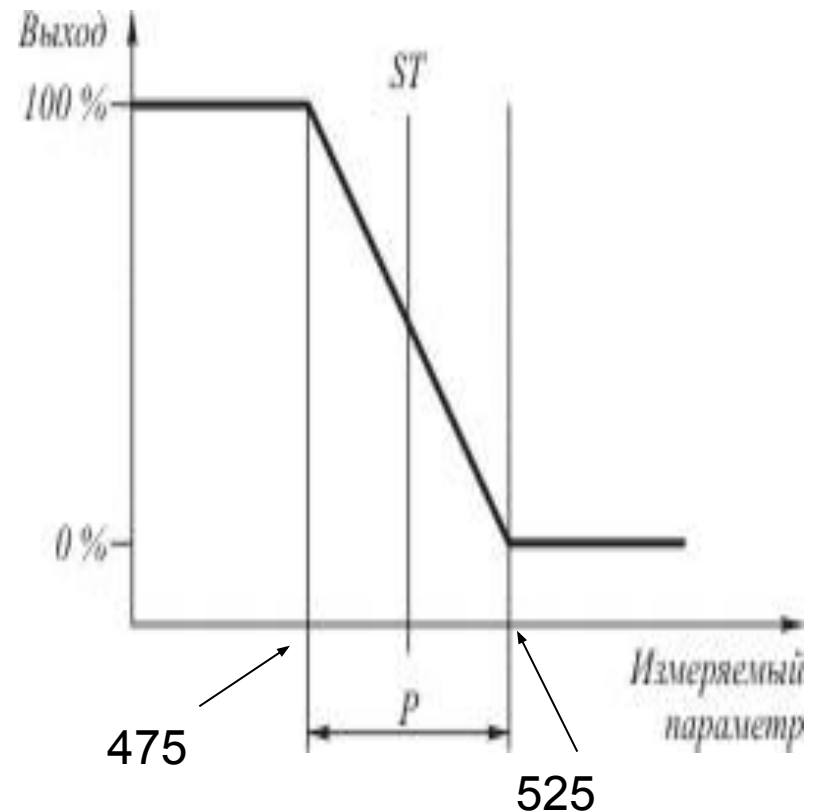


Например

Диапазон измерения температуры 0...1000 °С установка регулирования $ST = 500$ °С;

зона пропорциональности $P = 5\%$, что составляет 50 °С (5% от 1000 °С);

При значении температуры 475 °С и ниже управляющий сигнал будет иметь величину 100%; при 525 °С и выше – 0%. В диапазоне 475...525 °С (в зоне пропорциональности) управляющий сигнал будет изменяться пропорционально величине рассогласования с коэффициентом усиления $K = 100/P = 20$.

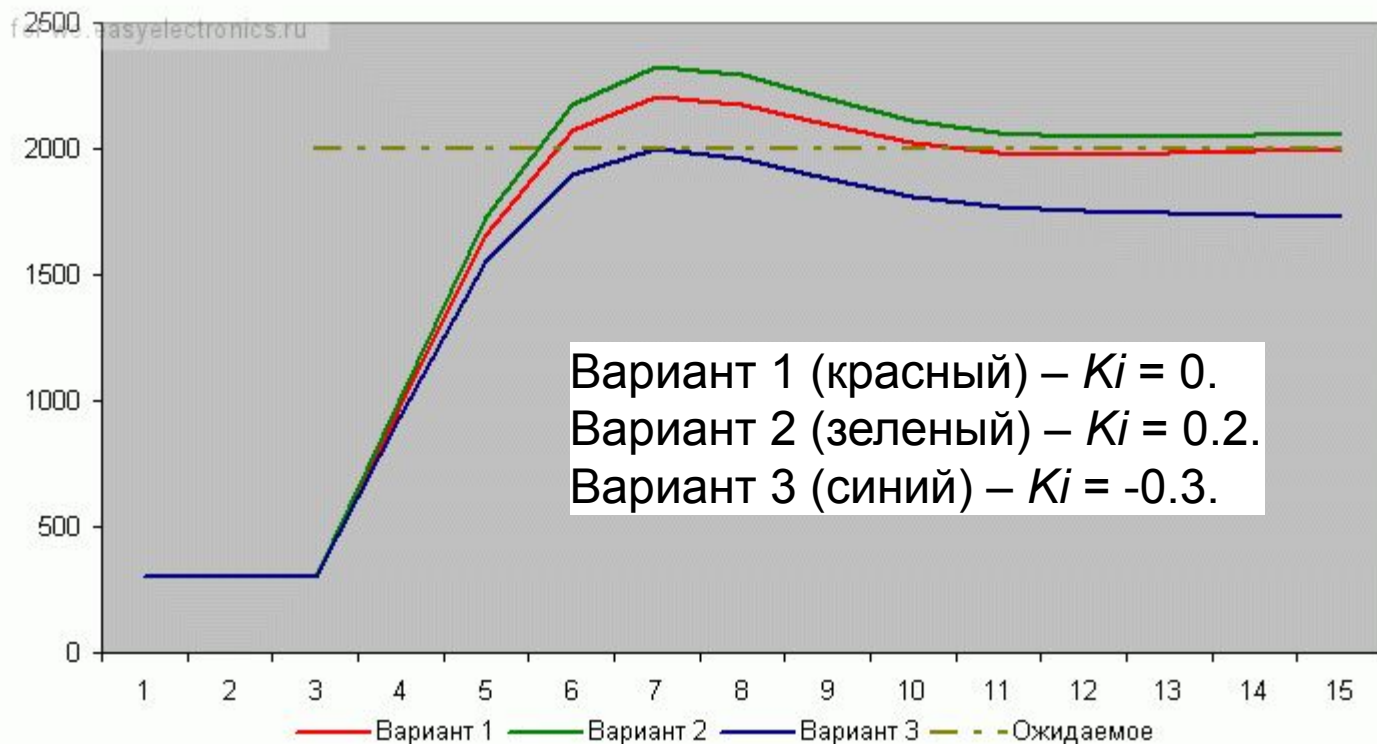


Важно

- Уменьшение значения зоны пропорциональности P увеличивает реакцию регулятора на рассогласование, т. е. малому рассогласованию будет соответствовать большее значение управляющего сигнала. Но при этом, из-за большого усиления, процесс принимает колебательный характер около значения уставки, и точного регулирования добиться не удастся.
- При излишнем увеличении зоны пропорциональности регулятор будет слишком медленно реагировать на образующееся рассогласование и не сможет успевать отслеживать динамику процесса. Для того, чтобы компенсировать эти недостатки пропорционального регулирования, вводится дополнительная временная характеристика – интегральная составляющая.

Интегральная составляющая ПИД регулятора

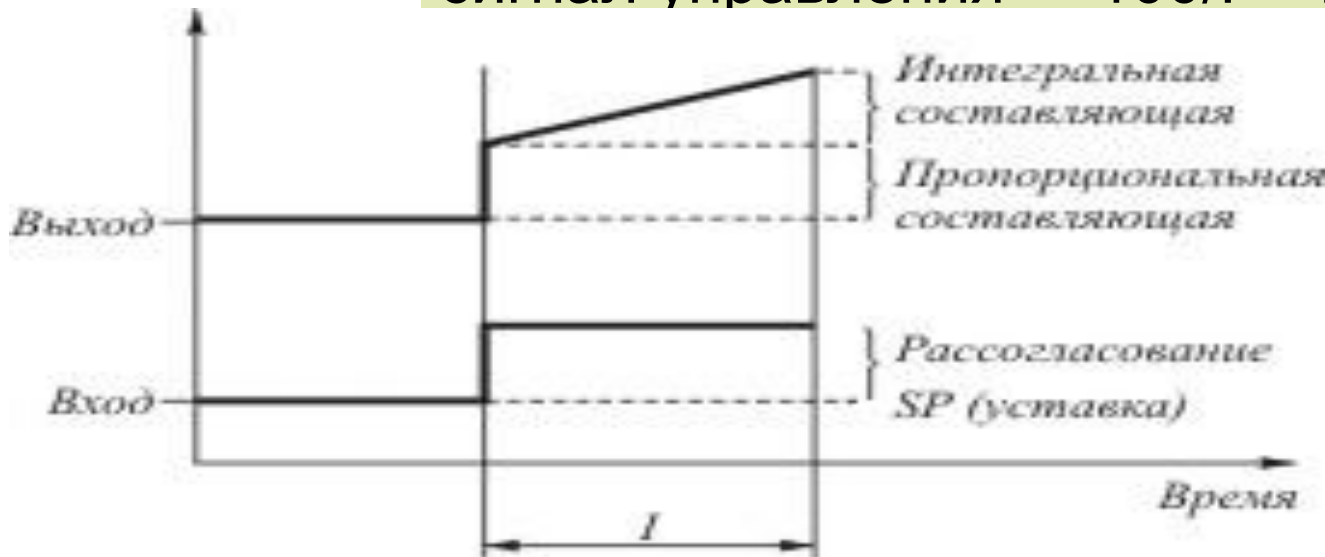
- Поведение выходного сигнала при изменении коэффициента интегрирования - накопление ошибки.



Интегральная составляющая

- Определяется постоянной времени интегрирования I , является функцией времени и обеспечивает изменение коэффициента усиления (сдвиг зоны пропорциональности) на заданном промежутке времени.

$$\text{сигнал управления} = 100/P \cdot E + 1/I \cdot \int E \, dt.$$



Как видно из рисунка, если пропорциональная составляющая закона регулирования не обеспечивает уменьшение рассогласования, то интегральная составляющая начинает на периоде времени I плавно увеличивать коэффициент усиления. Через период времени I процесс этот повторяется.

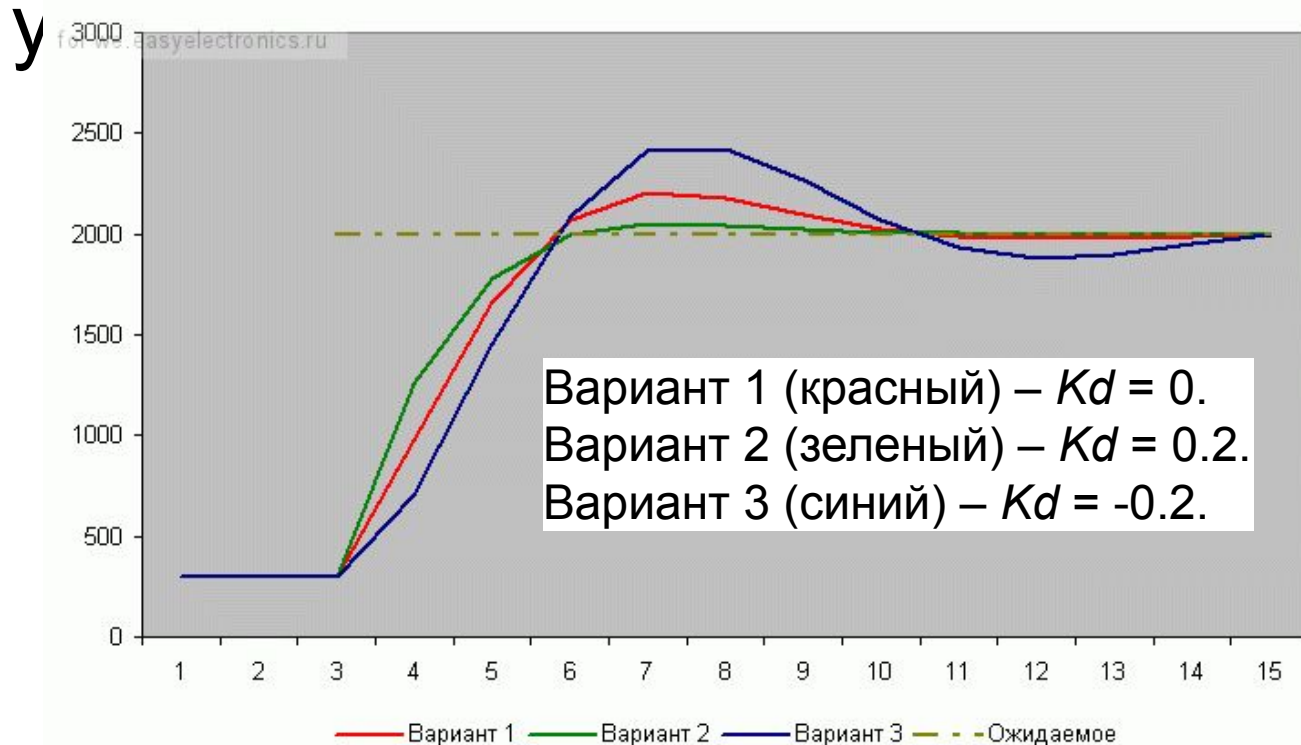
Дифференциальная составляющая

- Многие объекты регулирования достаточно инерционны, т. е. имеют задержку реакции на приложенное воздействие (мертвое время) и продолжают реагировать после снятия управляющего воздействия (время задержки).
- Дифференциальная составляющая есть производная во времени от рассогласования, т. е. является функцией скорости изменения параметра регулирования. В случае, когда рассогласование становится постоянной величиной, дифференциальная составляющая перестает оказывать воздействие на сигнал управления.

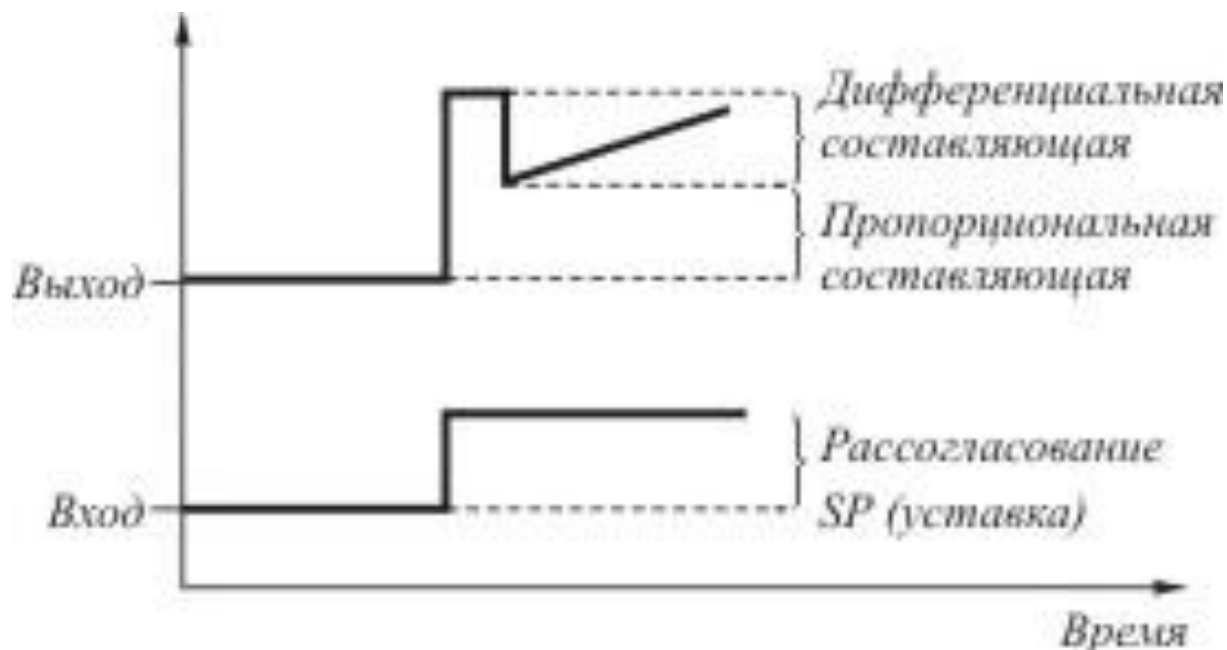
$$\bullet \text{сигнал управ.} = 100/P \cdot E + 1/I \cdot \int E \, dt + D \cdot d/dt \cdot E.$$

Дифференциальная составляющая ПИД регулятора

- Эта составляющая пропорциональна *темпу* изменений рассогласования. Она «придает



Влияние дифференциальной составляющей в ПИД законе



С введением дифференциальной составляющей регулятор начинает учитывать мертвое время и время задержки, заранее изменяя сигнал управления. Это позволяет значительно уменьшить колебания процесса около значения уставки и добиться более быстрого завершения переходного процесса.

Свойства системы с ПИД-регулятором

- ПИД - закон является наиболее совершенным из общепромышленных алгоритмов регулирования с точки зрения достижимого качества регулирования.
- Повышается быстродействие.
- Однако применение Д-составляющей повышает чувствительность регулятора к пульсациям входного сигнала.

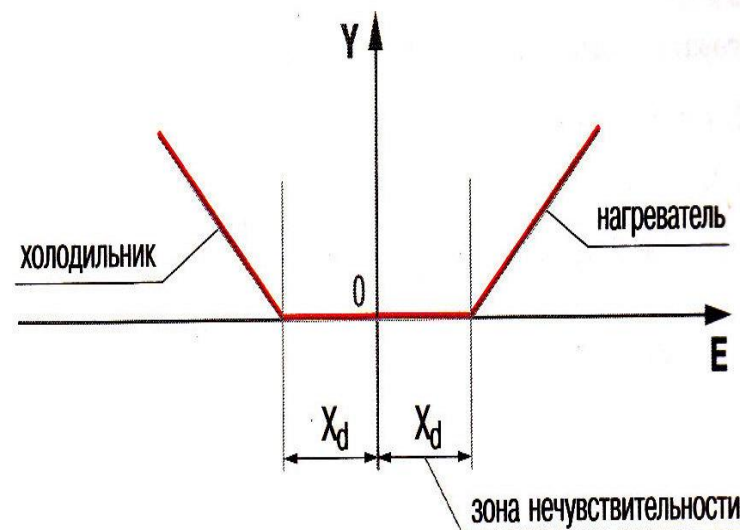
Параметры ПИД-регулирования

зона нечувствительности

- *Зона нечувствительности.* Для исключения излишних срабатываний регулятора при незначительных значениях рассогласования используется уточненное рассогласование вычисленное по следующим условиям:

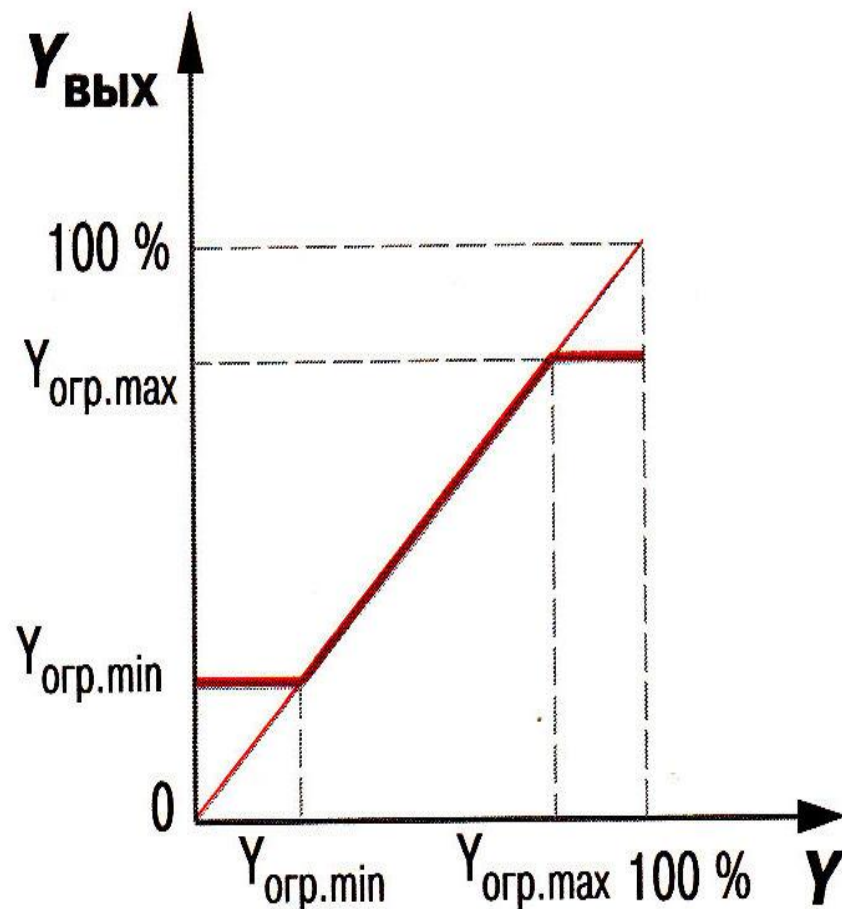
если $|E_i| \leq X_d$, то $E_p = 0$;
если $E_i > X_d$, то $E_p = E_i - X_d$;
если $E_i < -X_d$, то $E_p = E_i + X_d$;

где X_d — зона нечувствительности.



Параметры ПИД-регулирования. Ограничение управляющего сигнала

- Если существуют технологические ограничения, не позволяющие, например, выключить нагрев или, наоборот включить нагрев на полную мощность, то для выходного управляющего сигнала $Y_{\text{вых}}$ задаются ограничения в виде максимального или минимального значений.



Немного математики

$u(t)$ — наша **Функция**;

- P — пропорциональная составляющая;
- I — интегральная составляющая;
- D — дифференциальная составляющая;
- $e(t)$ — текущая ошибка;
- K_p — пропорциональный коэффициент;
- K_i — интегральный коэффициент;
- K_d — дифференциальный коэффициент;

$$u(t) = P + I + D = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

ПИД закон

- Дискретная реализация формулы на основе численных методов:

$$u(t) = P(t) + I(t) + D(t);$$

$$P(t) = K_p * e(t);$$

$$I(t) = I(t - 1) + K_i * e(t);$$

$$D(t) = K_d * \{e(t) - e(t - 1)\};$$

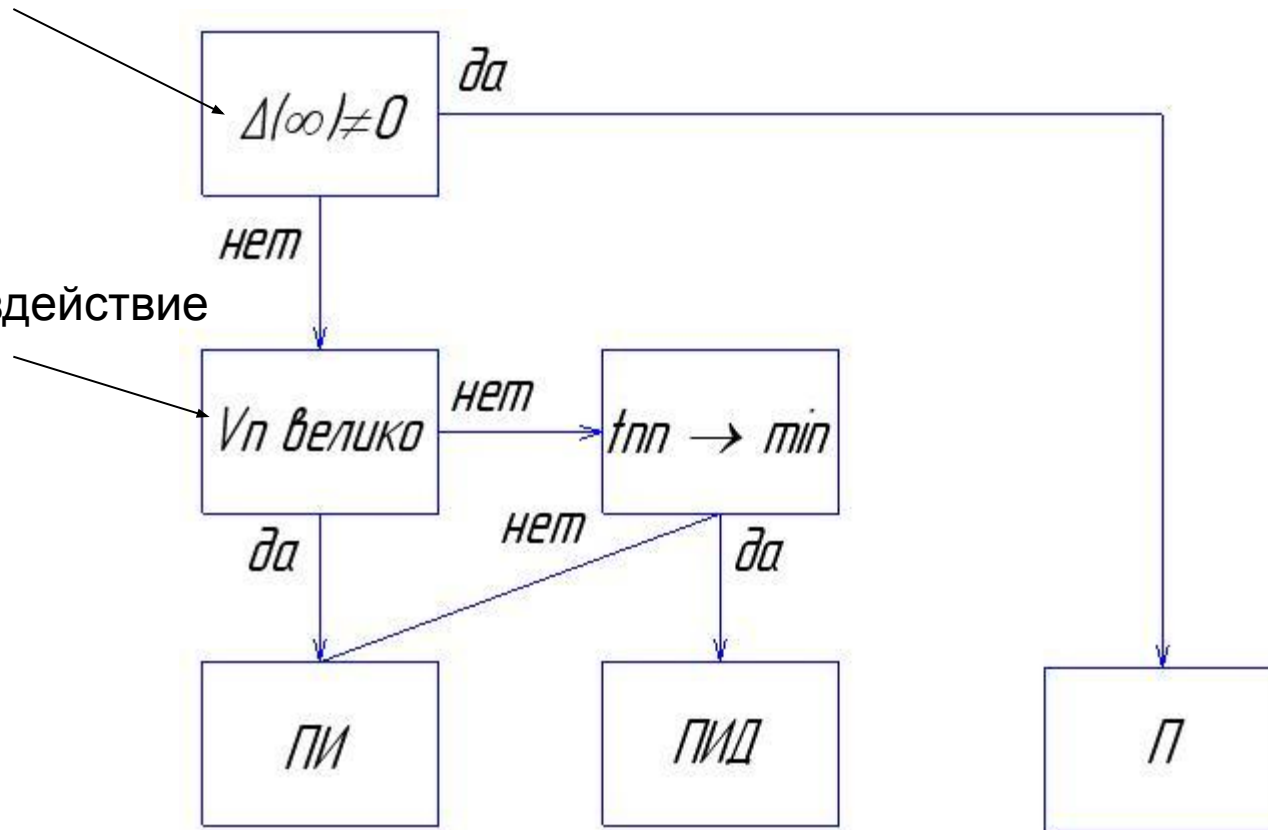
Настройка ПИД - регулятора

- Увеличение пропорционального коэффициента увеличивает быстродействие и снижает запас устойчивости;
- С уменьшением интегральной составляющей ошибка регулирования с течением времени уменьшается быстрее;
- Уменьшение постоянной интегрирования уменьшает запас устойчивости;
- Увеличение дифференциальной составляющей увеличивает запас устойчивости и быстродействие.

Выбор закона регулирования

Статическая ошибка

Внешнее воздействие



Первый шаг выбора регулятора

- Итак, в первую очередь, необходимо оценить, важно ли нам получить в результате переходного процесса статическую ошибку, равную нулю. То есть, если мы даем задание регулятору, к примеру, 25 градусов, а регулятор выходит на 25,5 и нас устраивает – смело переходим по стрелке вправо и выбираем П закон регулирования. Тут также присутствует одна тонкость. Для объекта без самовыравнивания по каналу задание-выход статическая ошибка равна нулю даже при использовании П регулятора

Второй шаг выбора закона регулирования

- Если же нам очень важно получить нулевую статическую ошибку, переходим по стрелке вниз. Далее необходимо оценить влияние возмущений на объект управления.

Третий шаг выбора закона регулирования

- В случае, если влияние внешних возмущений велико, то «оптимальным» алгоритмом будет ПИ закон регулирования, то есть пропорционально интегральный закон регулирования способен справиться с возмущениями, благодаря присутствию интегральной составляющей и, к тому же, получить нулевую статическую ошибку.

Четвертый шаг

- Если же влияние возмущений несущественное – переходим по стрелке вправо и оцениваем ещё один параметр

Пятый шаг

- Насколько важно время переходного процесса? Если время переходного процесса для вас не существенно, а ваш объект боится динамических забросов (характерным примером являются печи, в которых производится длительная выдержка заготовок при определенной температуре), то, опять же таки, стоит вернуться к ПИ закону.

Шестой шаг

- В случаи, если необходимо обеспечить минимальное время переходного процесса и выполняются все предыдущие условия – стоит выбрать ПИД алгоритм. Стоит отметить, что ПИД закон регулирования хорошо работает с объектами, в которых присутствует транспортное запаздывание.