ЭиУА

Дәуренов ӘД

Лекция 10. Регуляторы

Цель лекции

Изучить

- назначение,
- принцип работы и
- основные виды автоматических регуляторов,
- рассмотреть их классификацию и
- применение в промышленных системах автоматического управления.

План лекции

1. Понятие регулятора и его назначение.
2. Основные функции регулятора.
3. Принцип работы автоматического регулятора.
4. Основные элементы системы автоматического регулирования.
5. Классификация регуляторов по способу действия.
6. Классификация регуляторов по закону регулирования.
7. П, И, ПИ, ПД и ПИД-регуляторы.
8. Классификация регуляторов по способу реализации.
9. Применение регуляторов в промышленной автоматике.
10. Значение регуляторов в современных системах автоматизации.

1. Понятие регулятора и его назначение

Регулятор — это устройство или программный алгоритм, предназначенный для автоматического поддержания регулируемой величины на заданном уровне или её изменения по установленному закону путём формирования управляющего воздействия на объект.

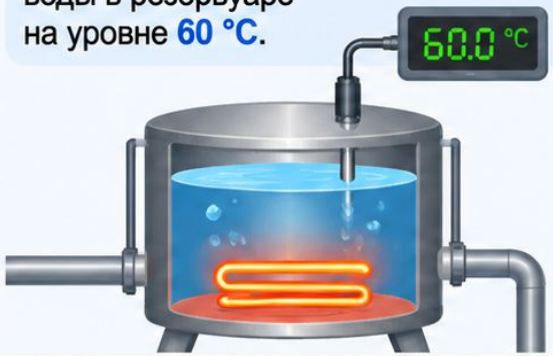
В промышленных системах автоматизации регулируемыми величинами могут быть:

- Температура.
- Давление.
- Уровень жидкости.
- Расход жидкости или газа.
- Скорость вращения электродвигателя.
- Положение исполнительного механизма.
- Напряжение и электрический ток.

Пример: автоматическое регулирование температуры

Задача

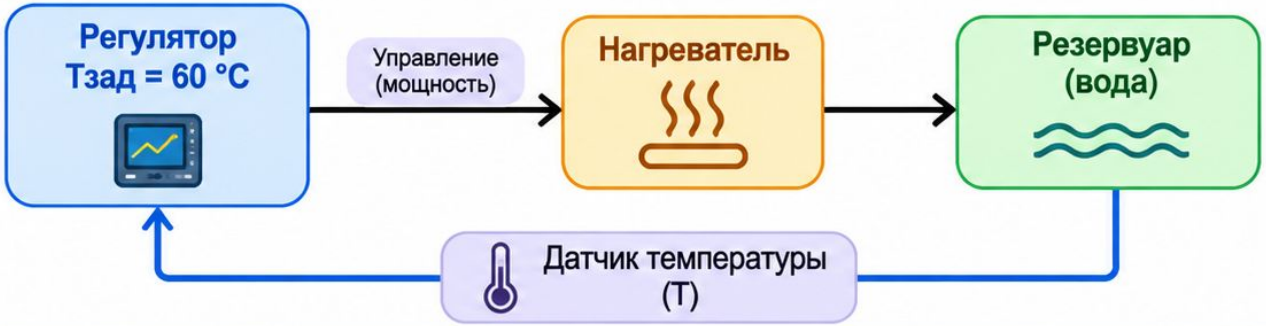
Поддерживать температуру воды в резервуаре на уровне **60 °C**.



Принцип работы регулятора

T = 50 °C (меньше 60 °C)	→	**Увеличивает** нагрев.
T = 60 °C (равно заданному)	→	Поддерживает мощность нагрева (компенсирует теплопотери).
T > 60 °C (больше 60 °C)	→	**Уменьшает** нагрев.

Функциональная схема системы



Результат

Температура автоматически поддерживается на заданном уровне без постоянного вмешательства оператора.

2. Основные функции регулятора

Функция	Назначение
Сравнение	Сопоставление заданного и фактического значений
Определение ошибки	Вычисление отклонения регулируемой величины
Формирование управляющего воздействия	Определение необходимого изменения управления
Компенсация возмущений	Противодействие внешним воздействиям
Поддержание заданного режима	Стабилизация технологического параметра

3. Принцип работы автоматического регулятора

Большинство промышленных систем автоматического регулирования используют отрицательную обратную связь.
Это означает, что фактическое значение регулируемой величины измеряется и сравнивается с заданным.
Разность между ними называется ошибкой регулирования.
где:

- e(t) — ошибка регулирования;
- r(t) — заданное значение;
- y(t) — фактическое измеренное значение.

$$e(t) = r(t) - y(t)$$

На основании ошибки регулятор формирует управляющий сигнал u(t).

Пример расчёта: регулирование температуры

Дано

Заданная температура:

$T_{зад} = 60\ °C$

Фактическая температура (1-й случай):

$T_{факт} = 52\ °C$

Фактическая температура (2-й случай):

$T_{факт} = 65\ °C$

Расчёт (1-й случай)

Ошибка (отклонение):

$$e = T_{зад} - T_{факт} = 60 - 52 = 8\ °C$$

Расчёт (2-й случай)

Ошибка (отклонение):

$$e = T_{зад} - T_{факт} = 60 - 65 = -5\ °C$$

Интерпретация

e > 0: температура **ниже** заданной.

Действие регулятора: увеличить нагрев (повысить температуру).

e < 0: температуря **выше** заданной.

Действие регулятора: уменьшить нагрев (снизить температуру).

Общая схема регулирования



Вывод

Регулятор формирует управляющее воздействие по величине ошибки e.

Конкретная реакция зависит от закона регулирования и настроек регулятора.

4. Основные элементы системы автоматического регулирования

Типовая система автоматического регулирования включает следующие элементы:

1. Задатчик — формирует требуемое значение параметра.
2. Датчик — измеряет фактическое значение.
3. Регулятор — рассчитывает управляющее воздействие.
4. Исполнительное устройство — изменяет физическое воздействие на процесс.
5. Объект регулирования — оборудование или технологический процесс, параметры которого необходимо поддерживать.

Пример реальной промышленной АСУ: регулирование давления в трубопроводе

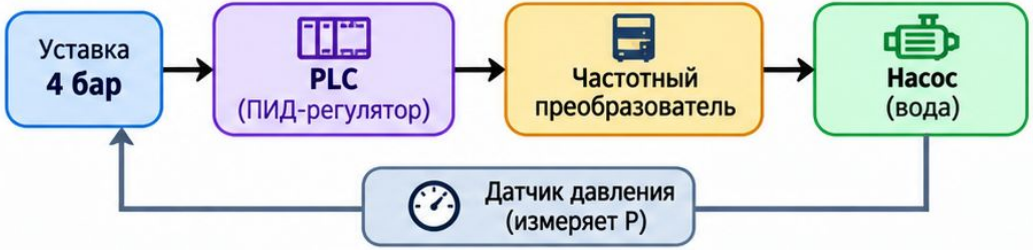
Задача: поддерживать давление воды на заданном уровне независимо от изменения расхода.

Пример: насосная станция, уставка давления — 4 бар.

Реальный объект: насосная станция



Схема автоматического регулирования (замкнутая система)



Отрицательная обратная связь

Соответствие элементов структурной схеме

Задание r(t)	Уставка давления 4 бар (на панели оператора HMI).
Регулятор	ПИД-регулятор в PLC (например, Siemens S7-1200).
Исполнительное устройство	Частотный преобразователь (изменяет скорость электродвигателя).
Объект регулирования	Насосная система и водопроводная сеть (давление в трубопроводе).
Датчик	Преобразователь давления (4–20 мА).

Как работает система

1. Датчик измеряет давление, например 3,2 бар.
2. PLC сравнивает измеренное давление с уставкой 4 бар.
3. Определяется ошибка: 4 – 3,2 = 0,8 бар.
4. ПИД-регулятор увеличивает задание частоты вращения насоса.
5. Насос повышает давление, а датчик непрерывно передаёт новое значение.
6. При приближении к 4 бар регулятор корректирует скорость насоса, чтобы поддерживать давление.

Итог: регулятор не изменяет давление непосредственно. Он формирует управляющий сигнал, а частотный преобразователь и насос воздействуют на давление.

Классификация регуляторов.

1) Классификация по способу действия
   (регуляторы прямого и непрямого действия)
2) Классификация по закону регулирования
   (ON/OFF), (П), (И), (ПИ), (ПД), (ПИД).

3) Классификация регуляторов по способу реализации
   (механические, пневматические, электронные и программные)

Регуляторы прямого действия

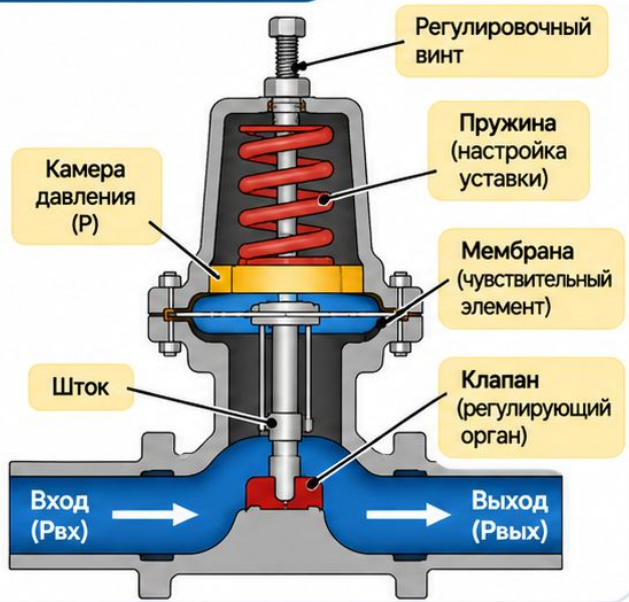
Регуляторы прямого действия — используют энергию регулируемой среды или непосредственно измеряемого воздействия для переммещения регулирующего органа без внешнего источника энергии.

Пример

Механический регулятор давления прямого действия



Принцип работы



Как регулируются?

Регулирование (настройка) выполняется механически — изменением сжатия пружины с помощью регулировочного винта (или гайки). Это задаёт требуемое значение параметра (уставку), например давления.



Способ регулирования: изменение предварительного сжатия пружины (жёсткости) с помощью регулировочного винта.

Результат: изменяется сила, с которой пружина противодействует давлению среды, и тем самым устанавливается новое значение регулируемого параметра.

Регулятор прямого действия – регулирует параметр автоматически, без PLC, электродвигателя и внешнего источника энергии для перемещения клапана. Он использует энергию самой регулируемой среды, например давление воды, газа или пара.

https://www.ovk-kom.ru/direct_pressure.html

Регуляторы непрямого действия

Регуляторы непрямого действия — используют дополнительную энергию или отдельный исполнительный механизм для формирования регулирующего воздействия.

Пример — электронный регулятор давления, который получает сигнал от датчика давления и управляет электроприводом клапана.

Пример оборудования



Датчик давления

4–20 мА (0–10 бар)



Электронный регулятор (ПИД-регулятор)

PV / SP



Исполнительный механизм (электропривод клапана)

4–20 мА / 0–10 В

Структура системы регулирования



Принцип работы

1. Датчик измеряет регулируемый параметр (давление) и передаёт сигнал на регулятор (например, 4–20 мА).
2. Электронный регулятор сравнивает измеренное значение с заданием (уставкой), вычисляет ошибку и формирует управляющий сигнал.
3. Управляющий сигнал подаётся на исполнительный механизм (электропривод), который изменяет положение регулирующего клапана.

Отличие от регулятора прямого действия: для работы системы требуется дополнительное питание (электроэнергия) или энергия привода, а управленческая функция выполняется электронным регулятором.

Классификация по закону регулирования

Закон регулирования определяет зависимость управляющего воздействия от ошибки регулирования и её изменения во времени.
По этому признаку выделяют следующие основные виды:

- Двухпозиционные регуляторы (ON/OFF).
- Пропорциональные (П).
- Интегральные (И).
- Пропорционально-интегральные (ПИ).
- Пропорционально-дифференциальные (ПД).
- Пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД).

Двухпозиционный регулятор

Двухпозиционный регулятор — имеет два основных состояния управляющего выхода: **включено (ON)** и **выключено (OFF)**.

Пример: термостат электрического нагревателя.



Термостат (двухпозиционный регулятор)



Электрический нагреватель (исполнительное устройство)

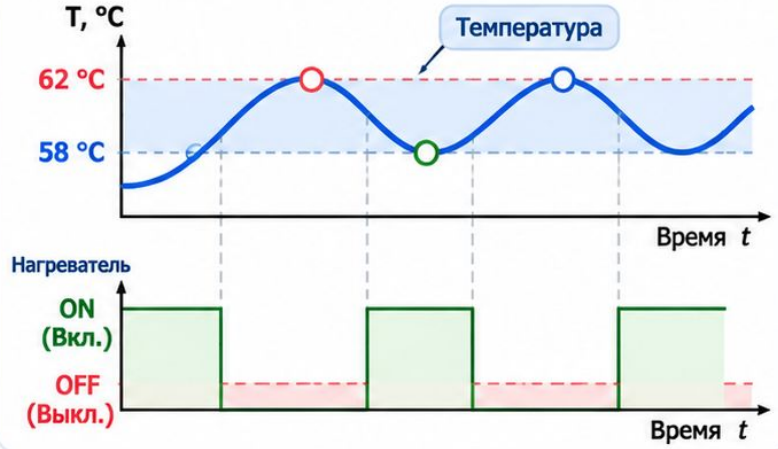
Принцип работы

Если температура **T ≤ 58 °C** — нагреватель **включается (ON)**.

Если температура **T ≥ 62 °C** — нагреватель **выключается (OFF)**.

В диапазоне **58...62 °C** сохраняется предыдущее состояние.

Двухпозиционное регулирование температуры



Гистерезис — разница между порогами включения и выключения (в данном примере: 62 – 58 = 4 °C). Он предотвращает слишком частое переключение исполнительного устройства.

Преимущества: простота, низкая стоимость и удобство применения.

Недостатки: регулируемая величина обычно колеблется около заданного значения, а исполнительное устройство периодически переключается.

Пропорциональный регулятор (P-регулятор)

P **Пропорциональный регулятор** формирует управляющее воздействие, пропорциональное текущей ошибке регулирования.

$$u(t) = K_p e(t)$$

где K_p — коэффициент пропорционального усиления.

Чем больше ошибка, тем больше управляющее воздействие (в выбранном направлении действия).

Пример: регулирование мощности нагревателя.



Пример расчёта

$K_p = 5\ \%/°C$

При ошибке e = 4 °C:

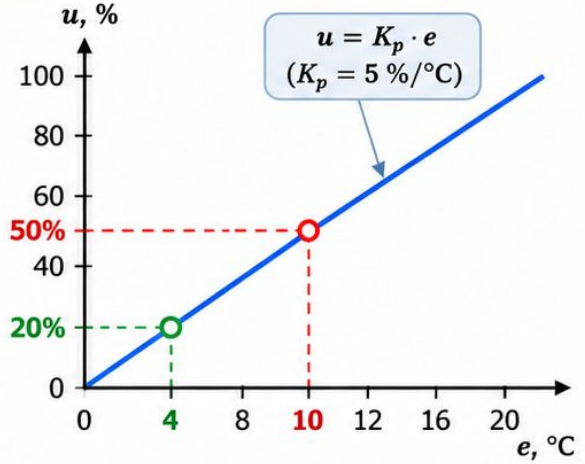
$u = K_p \cdot e = 5 \cdot 4 =$ **20%**

При ошибке e = 10 °C:

$u = K_p \cdot e = 5 \cdot 10 =$ **50%**

Выход регулятора ограничен диапазоном 0...100 %.

Характеристика P-регулятора



Преимущества: простота реализации и быстрая реакция на изменение ошибки.

Недостаток: во многих объектах при постоянных возмущениях сохраняется установившаяся ошибка.

Коэффициент пропорционального усиления Kp определяет, насколько сильно P-регулятор реагирует на ошибку регулирования. Коэффициент Kp не является постоянным для всех регуляторов. Его выбирает и настраивает инженер по автоматизации с учётом характеристик конкретного объекта. Например

- Скорость нагрева или охлаждения.
- Тепловая инерция.
- Мощность нагревателя.
- Запаздывание реакции объекта.
- Требуемая точность и устойчивость регулирования.

Инженер стремится подобрать коэффициент, при котором система реагирует достаточно быстро, но без чрезмерных колебаний.

Настройка	**Возможная реакция**
Малый Kp	Медленная реакция, слабое управляющее воздействие
Умеренный Kp	Более быстрая реакция, приемлемая устойчивость
Слишком большой Kp	Перерегулирование, колебания, возможная неустойчивость

Интегральный регулятор (I-регулятор)

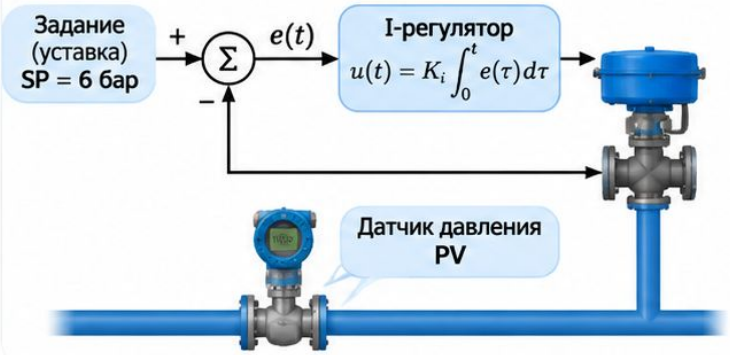
Интегральный регулятор формирует управляющее воздействие с учётом накопленной во времени ошибки регулирования.

$$u(t) = K_i \int_0^t e(\tau)\, d\tau$$

где K_i — коэффициент интегрального регулирования.

Простыми словами, I-регулятор учитывает не только величину ошибки, но и то, **как долго она существует.**

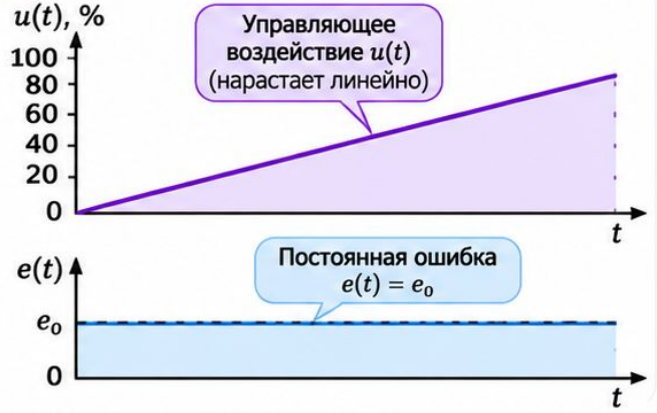
Пример: регулирование давления в трубопроводе.



Принцип работы

1. Если есть ошибка $e(t) \neq 0$, регулятор постепенно накапливает её во времени **(интегрирует).**
2. Накопленное значение увеличивает управляющее воздействие $u(t)$.
3. Управляющее воздействие растёт, пока ошибка не будет устранена $(e(t) \to 0)$.

Реакция системы при ступенчатой ошибке



Смысл интегральной составляющей: постепенно «добавлять» управляющее воздействие, пока ошибка не исчезнет, что позволяет устранить постоянную установившуюся ошибку.

Преимущество: позволяет устранить постоянную установившуюся ошибку при подходящих условиях.

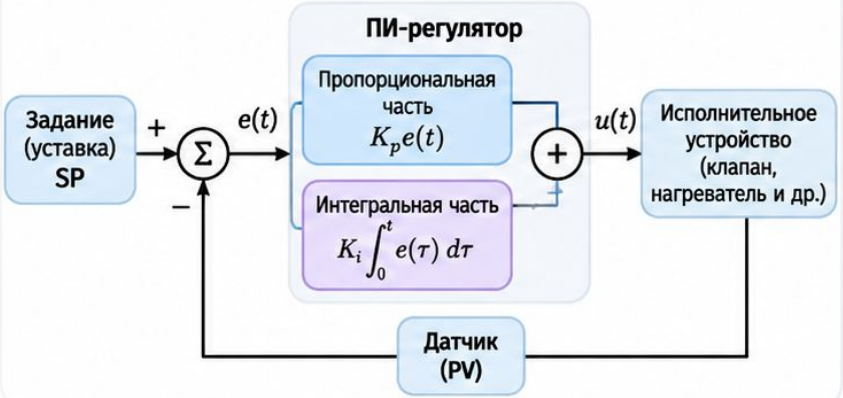
Недостаток: при неправильной настройке может вызвать значительное перерегулирование и колебания.

ПИ-регулятор (пропорционально-интегральный)

PI **ПИ-регулятор** объединяет пропорциональное и интегральное регулирование.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau)\, d\tau$$

Структурная схема

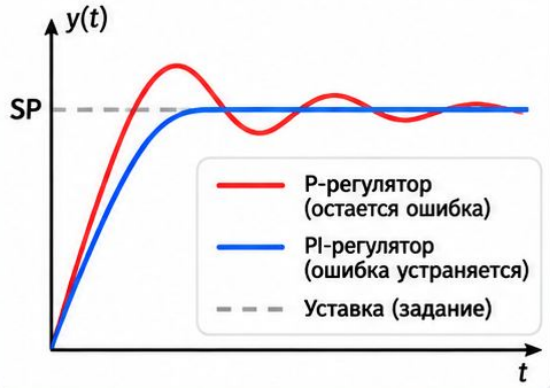


Принцип работы

P **Пропорциональная** составляющая $K_p e(t)$ — быстро реагирует на текущую ошибку.

I **Интегральная** составляющая $K_i \int_0^t e(\tau)\, d\tau$ — постепенно компенсирует длительное отклонение от заданного значения.

Переходная характеристика



Смысл: за счёт сочетания быстрого (P) и накопительного (I) действий регулятор быстро реагирует на изменение ошибки и в установившемся режиме устраняет постоянную ошибку (статическое отклонение).

Преимущества:

- отсутствие постоянной установившейся ошибки;
- более высокая точность регулирования;
- широкое применение (температура, давление, расход, скорость и др.).

Особенности / недостатки:

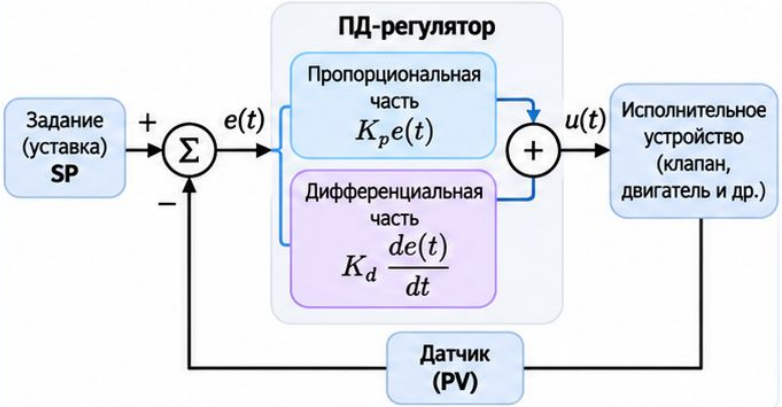
- при неправильной настройке (слишком большие K_p или K_i) возможны значительное перерегулирование и колебания;
- настройка сложнее, чем у P-регулятора.

ПД-регулятор (пропорционально-дифференциальный)

PD **ПД-регулятор** учитывает текущую ошибку и скорость её изменения.

$$u(t) = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Структурная схема

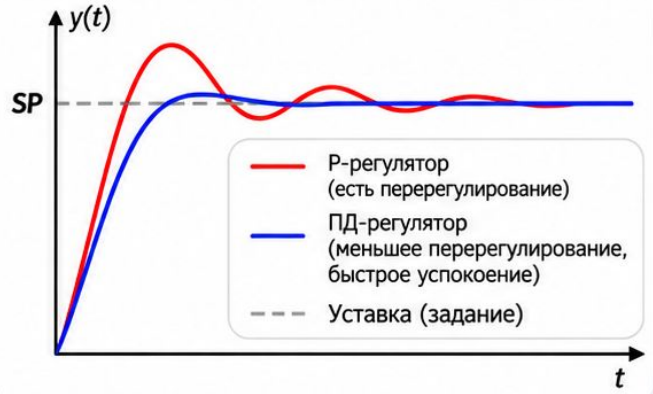


Принцип работы

P **Пропорциональная составляющая** $K_p e(t)$ – реагирует на величину текущей ошибки.

D **Дифференциальная составляющая** $K_d \frac{de(t)}{dt}$ – реагирует на скорость изменения ошибки (насколько быстро она меняется).

Реакция на ступенчатое изменение задания



Пример: при быстром приближении механизма к заданному положению ПД-регулятор может заранее уменьшать управляющее воздействие, снижая вероятность значительного перерегулирования.

Интуитивно: дифференциальная часть «тормозит» систему, когда ошибка быстро уменьшается (мы уже близко к цели).

Преимущество:
может улучшить переходные процессы и демпфирование (уменьшить колебания).

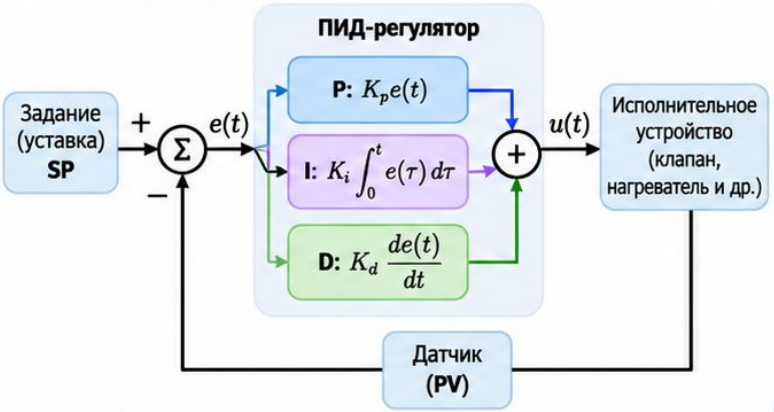
Недостаток: дифференциальная составляющая чувствительна к шумам измерений (может усиливать помехи).

ПИД-регулятор (пропорционально-интегрально-дифференциальный)

ПИД-регулятор объединяет три составляющие: пропорциональную, интегральную и дифференциальную.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau)\,d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

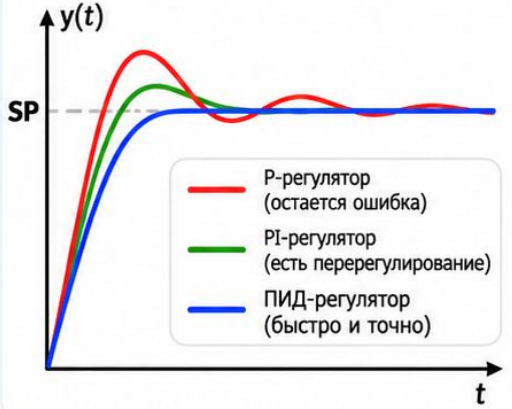
Структурная схема ПИД-регулятора



Роли составляющих

Составляющая	Что учитывает	Основное назначение
P	Текущую ошибку $e(t)$	Быстрая реакция на отклонение
I	Накопленную ошибку $\int_0^t e(\tau)\,d\tau$	Устранение длительного отклонения (статической ошибки)
D	Скорость изменения ошибки $\frac{de(t)}{dt}$	Улучшение переходного процесса (меньше перерегулирования)

Переходные процессы



Как это работает: P-часть быстро реагирует, I-часть постепенно устраняет остаточную ошибку, D-часть прогнозирует её изменение и «смягчает» реакцию системы.

Применение: регулирование температуры, давления, расхода, скорости, положения и др.

Преимущества:

- высокая точность (отсутствие постоянной ошибки);
- быстрый и устойчивый переходный процесс;
- универсальность и широкое применение.

Особенности / недостаток:

- эффективность зависит от правильного выбора коэффициентов K_p, K_i и K_d;
- неправильная настройка может вызвать перерегулирование и колебания.

Сравнение основных законов регулирования

Тип регулятора	Принцип работы	Характерная особенность
ON/OFF	Включение или выключение	Простота
П	Воздействие пропорционально ошибке	Быстрая реакция
И	Учитывает накопленную ошибку	Устранение установившейся ошибки
ПИ	Сочетает П и И	Баланс быстродействия и точности
ПД	Сочетает П и Д	Улучшение переходного процесса
ПИД	Сочетает П, И и Д	Гибкая настройка динамики регулирования

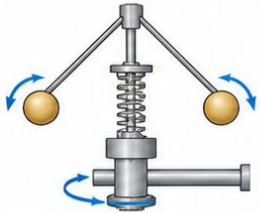
Нельзя утверждать, что ПИД-регулятор всегда лучше остальных. Выбор закона регулирования зависит от особенностей объекта, требуемой точности, быстродействия и сложности системы.

Реализация и применение регуляторов

Классификация регуляторов по способу реализации

По способу технической реализации регуляторы делятся на механические, пневматические, электронные и программные.

Механические регуляторы



Используют движение, усилия пружин, мембран, грузов и другие механические воздействия.

Пример: центробежный регулятор частоты вращения (изменение скорости перемещает грузы и формирует регулирующее воздействие).

Пневматические регуляторы



Используют давление сжатого воздуха для формирования и передачи управляющего воздействия.

Пример: регулятор давления сжатого воздуха, поддерживающий давление на выходе пневматической системы.

Электронные регуляторы



Обрабатывают электрические сигналы датчиков и формируют управляющие сигналы для исполнительных устройств.

Пример: цифровой регулятор температуры, управляющий нагревателем через реле или твердотельное коммутационное устройство.

Программные регуляторы



Реализуются в PLC, промышленных компьютерах и других вычислительных устройствах.

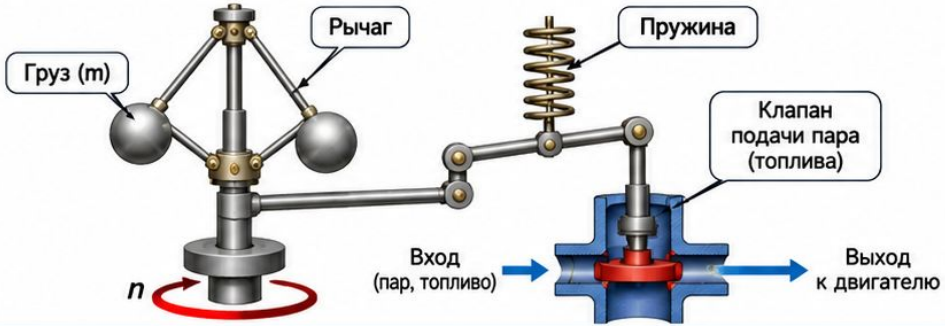
Пример: ПИД-регулятор в Siemens S7-1200, который обрабатывает сигнал датчика и рассчитывает управляющее воздействие по заданному алгоритму.

Вывод: в современных системах автоматизации широко применяются электронные и программные регуляторы, поскольку они позволяют гибко изменять настройки, выполнять диагностику и интегрироваться с системами мониторинга.

Механический регулятор

Механический регулятор — использует движение, силу пружины, грузов или рычагов для изменения регулирующего воздействия.

Центробежный регулятор (принципиальная схема)



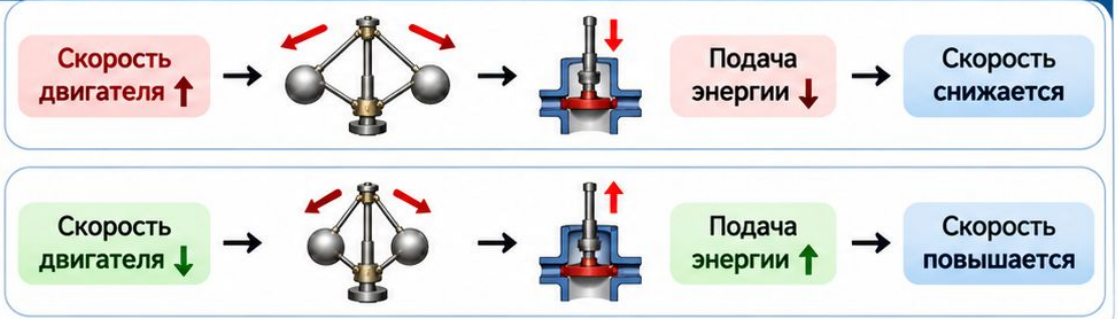
Реальный пример применения



Принцип работы (пример)

1. Вал двигателя вращается и приводит во вращение два груза регулятора.
2. Когда скорость увеличивается, грузы под действием центробежного эффекта расходятся наружу.
3. Через рычажный механизм перемещение грузов изменяет положение клапана подачи пара или топлива.
4. Подача энергии уменьшается, и двигатель замедляется.
5. При снижении скорости грузы сближаются, и механизм увеличивает подачу энергии.

Принцип регулирования



Важно: здесь нет электронного контроллера. Регулирование осуществляется механически за счёт вращения грузов, пружин и рычагов.

Контроллер, регулятор и исполнительный механизм — это разные понятия. Но есть важный нюанс: регулятор может быть реализован внутри контроллера. ПИД-регулятор — не отдельный физический прибор, а алгоритм, который выполняется внутри PLC.

Устройство	Основная задача	Пример
Контроллер (PLC)	Получает сигналы, выполняет программу и формирует команды	Siemens S7-1200
Регулятор	Вычисляет управляющее воздействие, чтобы поддерживать заданное значение	ПИД-регулятор
Исполнительный механизм	Физически выполняет управляющее воздействие	Электропривод клапана
Датчик	Измеряет фактическое значение	Датчик температуры PT100

Электронный регулятор – может быть самостоятельным устройством,
а PLC может выполнять функции сразу нескольких регуляторов.

Необходимо различать исполнительный механизм и регулирующий орган.

Например, в системе регулирования расхода воды:

- PLC рассчитывает команду.
- Электропривод — исполнительный механизм, который создаёт движение.
- Регулирующий клапан — регулирующий орган, который изменяет расход воды.

Иногда привод и клапан рассматривают вместе как исполнительное устройство.

Вкратце!

Контроллер — это устройство управления,

Регулятор — функция или устройство регулирования,

а Исполнительный механизм — устройство, которое физически реализует команду.

Поэтому в современных промышленных системах часто используется схема:

Датчик → PLC (внутри ПИД-регулятор) → исполнительный механизм → регулирующий орган → технологический процесс.

Пример 1. Регулирование температуры (промышленная печь)

Объект управления



Промышленная электрическая печь (термообработка изделий)

Схема системы регулирования (замкнутый контур)



Реальные элементы АСУ

	**Датчик**	Термопара типа K (–200…+1260 °C).
	**Регулятор**	ПИД-регулятор в PLC Siemens SIMATIC S7-1200.
	**Исполнительное устройство**	Тиристорный регулятор мощности (например, Siemens SITOP).
	**Нагреватель** (объект воздействия)	Электрические ТЭНы (нагрев камеры печи).

Как работает система

1. Оператор задаёт требуемую температуру, например $T_{зад}$ = 800 °C.
2. Термопара измеряет фактическую температуру в печи $T_{факт}$.
3. PLC вычисляет ошибку $e = T_{зад} - T_{факт}$ и по ПИД-алгоритму формирует управляющий сигнал.
4. Тиристорный регулятор изменяет подводимую мощность к ТЭНам.
5. Температура в печи изменяется и поддерживается на заданном уровне.

Итог: регулятор (ПИД в PLC) изменяет подводимую мощность нагревателей, чтобы поддерживать заданную температуру в промышленной печи.

Пример 2. Регулирование давления

Задача

Поддерживать давление воды на уровне 4 бар.



Структура АСУ



Итог

Регулятор изменяет скорость насоса, чтобы поддерживать давление.

Пример 3. Регулирование уровня жидкости

Задача

Поддерживать уровень в резервуаре на заданной отметке.



Структура АСУ



Итог

Регулятор управляет клапаном, чтобы поддерживать уровень жидкости.

Пример 4. Регулирование скорости электродвигателя

Задача

Поддерживать скорость конвейера на заданном уровне.



Структура АСУ



Итог

Регулятор изменяет частоту вращения двигателя для поддержания скорости.

Значение регуляторов в автоматизации

Автоматические регуляторы обеспечивают:

- Стабильность технологических процессов — поддержание заданных параметров при изменении условий работы.
- Повышение качества продукции — уменьшение отклонений температуры, давления, скорости и других величин.
- Снижение участия оператора — автоматическую коррекцию технологических параметров.
- Повышение энергоэффективности — более рациональное управление исполнительными устройствами.
- Улучшение управляемости оборудования — возможность поддерживать требуемые режимы работы.

При этом регулятор не заменяет независимые устройства защиты. Например, аварийное отключение нагревателя при опасной температуре должно выполняться с учётом требов

Заключение

Регулятор является одним из основных функциональных элементов системы автоматического управления. Его задача заключается в формировании управляющего воздействия, направленного на поддержание регулируемой величины на заданном уровне или её изменение по установленному закону.

По способу действия различают регуляторы прямого и непрямого действия. По закону регулирования — двухпозиционные, П-, И-, ПИ-, ПД- и ПИД-регуляторы. По способу реализации — механические, пневматические, электронные и программные.

Выбор конкретного регулятора определяется характеристиками объекта, требованиями к точности, быстродействию, надёжности и условиями эксплуатации.

Контрольные вопросы

Что такое автоматический регулятор?
Каково основное назначение регулятора?
Какие технологические параметры можно регулировать?
Что называется ошибкой регулирования?
Для чего необходима обратная связь?
Какие элементы входят в систему автоматического регулирования?
Чем отличаются регуляторы прямого и непрямого действия?
Как работает двухпозиционный регулятор?
Для чего используется гистерезис?
Каков принцип работы П-регулятора?

Чем отличается И-регулятор от П-регулятора?
Какие функции выполняет ПИ-регулятор?
Для чего используется дифференциальная составляющая?
Из каких составляющих состоит ПИД-регулятор?
Какие виды регуляторов выделяют по способу реализации?
Как реализуется регулятор в PLC?
Какие регуляторы применяются для управления температурой?
Как осуществляется регулирование давления насосной станцией?
Почему выбор закона регулирования зависит от объекта?
Каково значение регуляторов в современной промышленной автоматизации?