

КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

СОДЕРЖАНИЕ

КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ

РАЗОМКНУТЫЙ КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ

ЗАМКНУТЫЙ КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ

УРОВНИ КОНТУРОВ УПРАВЛЕНИЯ

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ С ЗАМКНУТЫМ КОНТУРОМ

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ С РАЗОМКНУТЫМ КОНТУРОМ

КЛАССИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ

КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

ПРИНЦИП СУПЕРПОЗИЦИИ

ПРИНЦИПЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

ТРЕБОВАНИЯ К ПРОМЫШЛЕННЫМ СИСТЕМАМ РЕГУЛИРОВАНИЯ

СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

КРИТЕРИИ УСТОЙЧИВОСТИ И КАЧЕСТВА СИСТЕМЫ

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СВОЙСТВ И ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ

ТИПЫ РЕГУЛЯТОРОВ. ЗАКОНЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

ДВУХПОЗИЦИОННЫЙ РЕГУЛЯТОР

ТРЕХПОЗИЦИОННЫЙ РЕГУЛЯТОР

МНОГОПОЗИЦИОННЫЙ РЕГУЛЯТОР

ТИПОВЫЕ ЗВЕНЬЯ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ

ПИД РЕГУЛЯТОР

ПИД РЕГУЛЯТОР: П-составляющая

ПИД РЕГУЛЯТОР: И-составляющая

ПИД РЕГУЛЯТОР: Д-составляющая

ПИД РЕГУЛЯТОР: Базовый алгоритм со встроенным таймером задержки

ПИД РЕГУЛЯТОР: Диагностика целостности контура управления

ПИД РЕГУЛЯТОР: Методы настройки

ПИД РЕГУЛЯТОР: Метод анализа переходной характеристики

ПИД РЕГУЛЯТОР: Метод реакции системы на однократное воздействие

ПИД РЕГУЛЯТОР: Метод Зиглера-Николсона

ПИД РЕГУЛЯТОР: Метод быстрого подбора коэффициентов

КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ

В теории управления различают технические системы:

- **ручные** — где процесс управления полностью подчинен человеку
- **автоматизированные** — где процесс управления частично подчинен человеку, а частично автоматике.
- **автоматические** — где процесс управления в большей степени подчинен автоматике и очень ограниченно человеку (роль человека здесь — задание настроек процесса, мониторинг состояния процесса, обеспечение работоспособности систем).

Под автоматикой понимается аппаратная или программная система (или аппаратно-программная), обеспечивающая частичную или полную автоматизацию часто повторяющихся или сложных («рутинных») работ.

Управление системой можно представить в виде информационного процесса, объединяющего некий Субъект и Объект управления каналами связи (передачи данных). Такую схему взаимодействия в системах управления называют **Контуром управления**.

Контур управления — схема структуры управления, включающую в себя: субъект и объект управления, средства взаимосвязи между ними (входная и выходная информация), а также различные внешние возмущающие факторы (воздействия).

Субъект управления - сторона, принимающая решения и управляющая объектами путем воздействия на управляемую систему для достижения определенных целей. Обычно субъектом в системе управления является человек (в зависимости от специфики процесса управления) — например, владелец процесса (президент, директор организации), руководитель заказа, главный инженер, технолог, оператор.

Объект управления (ОУ) — динамический производственный, технологический или технический объект, участвующий в определенном взаимодействии с другими объектами или процессами, нуждающийся в специальном организованном управляющем воздействии. Объектом управления может быть отдельный механизм, машина, станок, агрегат, рабочий или бригада рабочих, цех или вся организация в целом.

Каналы связи между субъектом и объектом:

- **прямая связь** — входная информация (команды, целеуказания), передаваемая от субъекта к объекту
- **обратная связь** — выходная информация (результат выполнения команды, целеуказания), передаваемая от объекта к субъекту.

Контур управления отражает характер системы управления и в зависимости от формирования управляющих воздействий может быть:

- **разомкнутый контур** — учитывается только входная информация и не учитывается (не контролируется) выходная.
- **замкнутый контур** — учитывается входная и выходная информация.

Задача процесса управления — приближение действительного состояния объекта управления к ожидаемому (желаемому) субъектом.

КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

РАЗОМКНУТЫЙ КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ

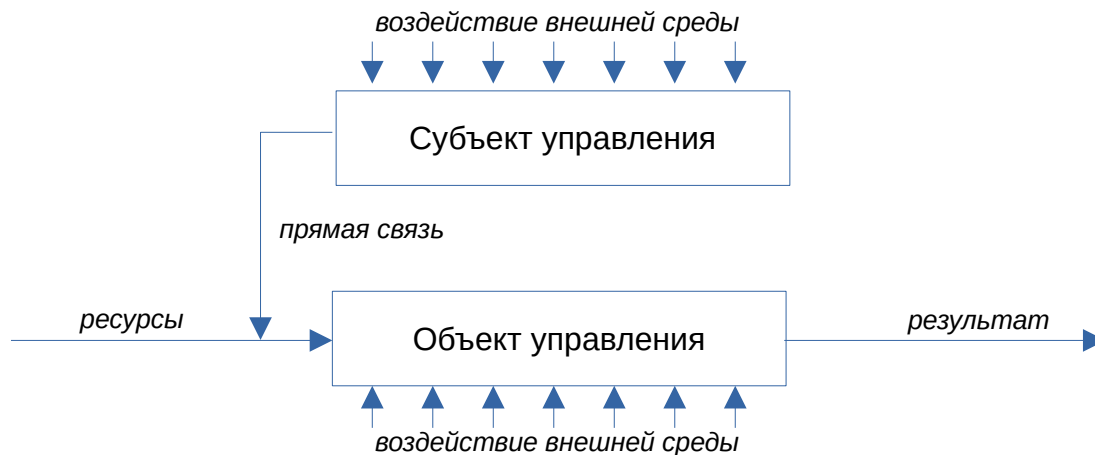
В основе этого принципа работы Разомкнутого контура управления лежит идея автономного воздействия на систему независимо от условий ее работы — система неконтролируемая (без обратной связи между субъектом и объектом) и определяется ее заранее известными внутренними свойствами.

Особые требования к системам с разомкнутым контуром:

- состояния среды и системы должны быть известны на всем интервале их функционирования
- любая реакция системы на рассчитанное воздействие должна быть заранее предопределена и описана в виде функции

В таких системах заранее программируется входное воздействие и предопределенный результат.

Система управления с разомкнутым контуром не защищена от исключительных воздействий: если воздействие отлично от предполагаемого, то последует отклонение результата (вплоть до критического). Поэтому подобный принцип используется при уверенности в достоверности сведений об условиях работы системы. Например, для организационных систем подобная уверенность допустима при высокой исполнительской дисциплине, когда отданное распоряжение не нуждается в последующем контроле.



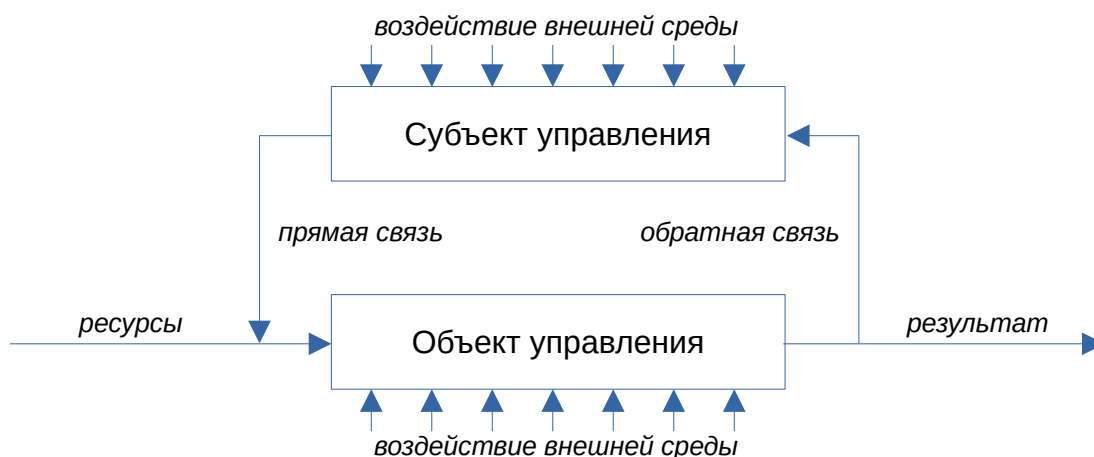
КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

ЗАМКНУТЫЙ КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ

Принцип работы Замкнутого контура управления является базовым (классическим) с точки зрения теории управления. Здесь в процессе управления существует непрерывная информационная связь между входным воздействием и выходной величиной — прямая и обратная связь между субъектом и объектом.

В таких системах заранее программируется не входное воздействие, а требуемое состояние системы. Для реализации принципа находится закон изменения состояния системы во времени (функция от t), а задача системы формулируется как обеспечение приближения действительного состояния к желаемому. Решение задачи достигается определением разности между желаемым состоянием и действительным. Данная разность используется для управления, призванного свести к минимуму обнаруженную разность (рассогласование).

Широкое распространение замкнутых контуров в естественных и искусственных системах объясняется продуктивностью их организации: задача управления эффективно решается на концептуальном уровне благодаря введению отрицательной обратной связи.

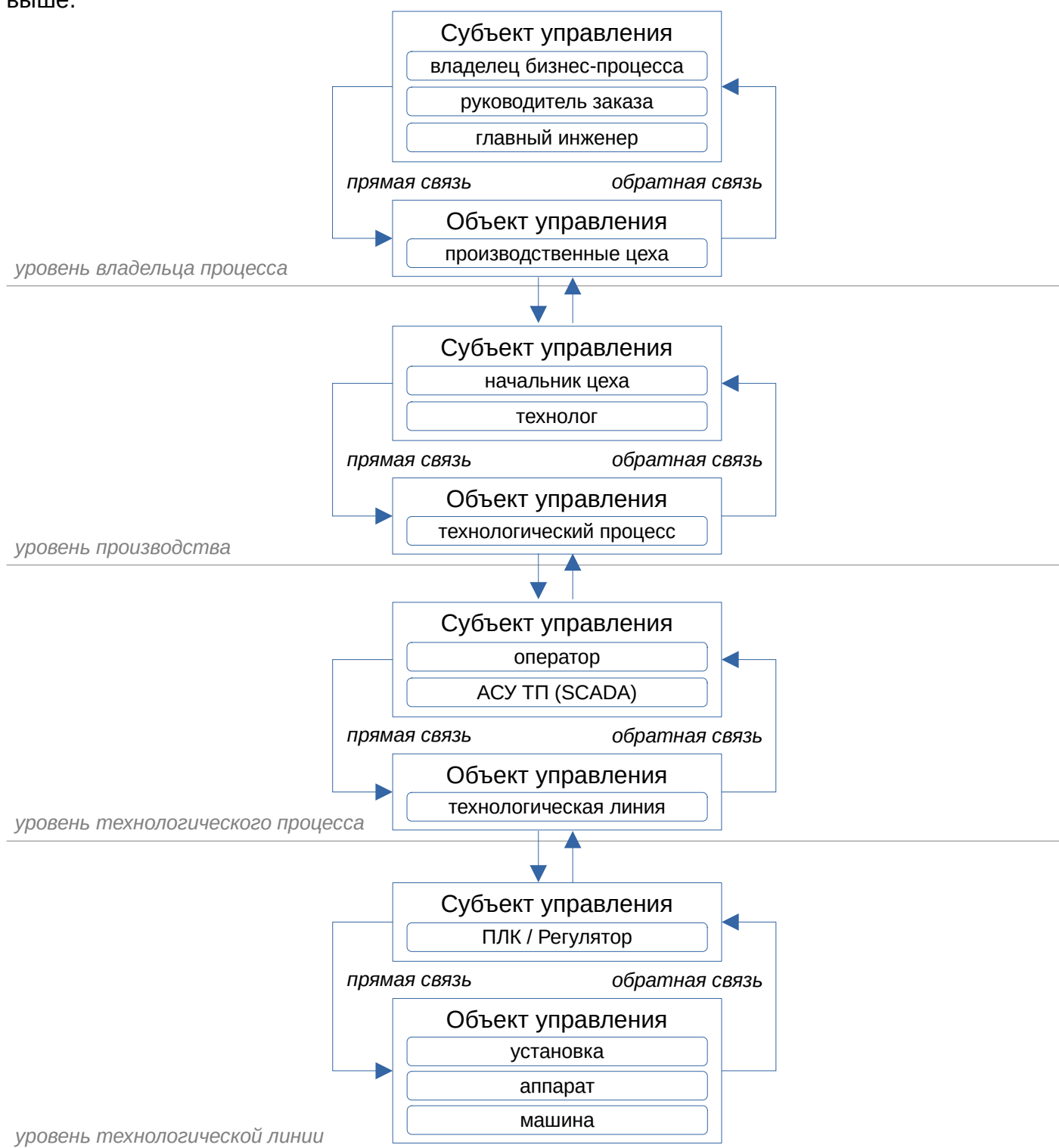


КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

УРОВНИ КОНТУРОВ УПРАВЛЕНИЯ

Процесс может состоять как из одного / нескольких контуров, объединенных одной системой управления, так и из множества контуров, где для каждого контура применяется своя система управления (применимо для Распределенных систем управления). В таких случаях, для управления группой контуров низшего уровня используются централизованные контуры управления среднего и высшего уровней.

Таким образом, выстраивается определенная многоуровневая структура системы управления всего бизнес-процесса (например, система управления производственного предприятия) - все уровни автоматической системы управления технологическими процессами и производственным предприятием (АСУ ТП и ПП) — от поля до ERP, MES и выше.



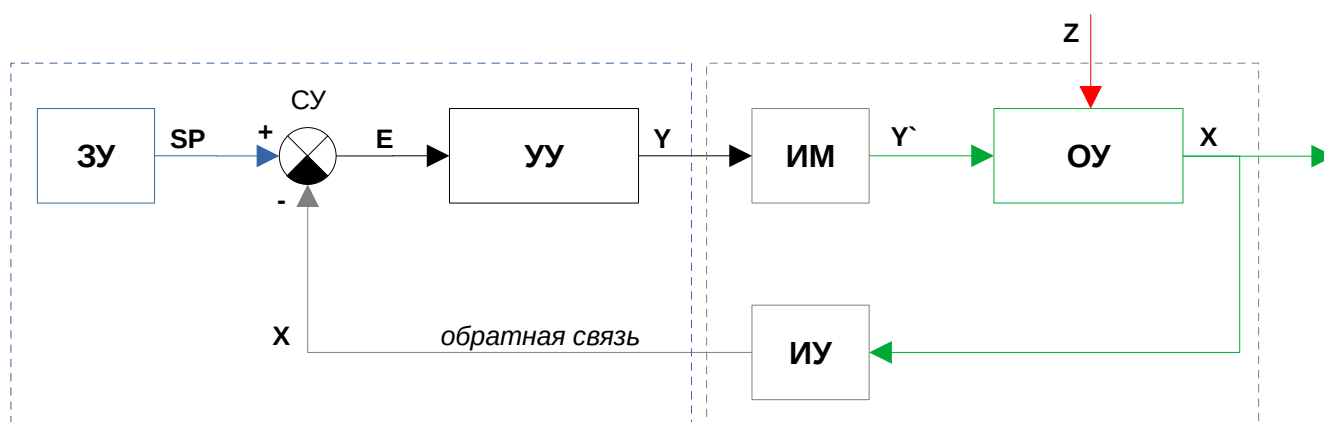
КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА

Структура — основная характеристика системы, представляющая собой совокупность элементов и связей между ними, определяемую исходя из распределения функций и целей, поставленных перед системой.

В общем случае САУ включает в себя следующие элементы:

- Субъект управления
 - Задающее устройство (ЗУ) / Задатчик
 - Сравнивающее устройство (СУ)
 - Устройство управления (УУ) / Регулятор
- Объект управления (ОУ)
 - Исполнительный механизм (ИМ)
 - Измерительное устройство (ИУ)



Элементы САУ посредством сигналов передают друг другу информацию о происходящих в них процессах. Информация всегда связана с материальным носителем какой-либо физической величины — **Носитель сигнала** (электрический ток или напряжение, давление, температура, механическое перемещение и т. д.). Конструктивные элементы системы должны преобразовывать одни величины (и сигналы) в другие.

Любой производственный, технологический процесс или технический объект характеризуется определенными физическими параметрами (например, расход вещества и энергии, температура, давление). Для обеспечения требуемого режима эти параметры необходимо поддерживать постоянными или изменять по определенному закону.

Регулируемый параметр (X) — параметр производственного, технологического процесса или технического объекта, который необходимо поддерживать постоянным или изменять по определенному закону. Регулируемый параметр является выходной величиной ОУ. В некоторых информационных источниках он называется — **Отклик системы** на возмущающее воздействие.

Заданное значение контролируемого параметра / Уставка (SP) — значение регулируемого параметра (X), которое, согласно заданию, должно быть обеспечено производственным, технологическим процессом или техническим объектом в данный момент времени.

КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА

Исполнительный механизм (ИМ) — часть объекта управления, которая предназначена для изменения режима работы объекта в соответствии с заданным регулирующим воздействием (Y). В качестве исполнительного механизма может быть: привод (электрический или пневматический), заслонка, клапан, свеча зажигания (пьезоэлектрическая) и др. В ряде случаев ИМ может отсутствовать, в этом случае воздействие на объект управления осуществляется непосредственным (прямым) изменением состояния какой-либо величины без помощи промежуточного (например, механического) устройства.

Задающее устройство (ЗУ) — подает на вход САУ целевое указание (настройки, команды, уставки, SP), которое может иметь постоянную заданную величину или может изменяться по определенному закону. Обычно целевое указание выдает человек. В современных САУ в качестве задающего устройства используется какой-либо человеко-машинный интерфейс (HMI): кнопки, клавиатура или сенсорный экран.

Измерительное устройство (ИУ) — часть объекта управления, предназначенная для измерения регулируемого параметра (X) в текущий момент времени. Это какие-либо датчики (контрольно-измерительные приборы — КИП).

Сравнивающее устройство (СУ) — предназначено для сравнения регулируемого параметра (X) с ее уставкой (SP) и выявления отклонения (расхождения). СУ выдает значение выявленного отклонения - **рассогласование** (E).

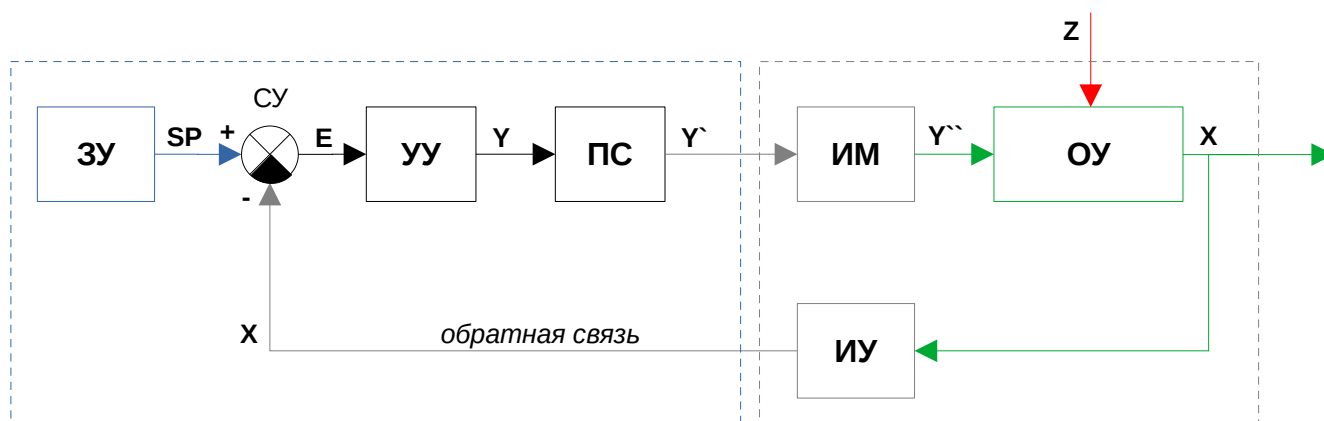
Устройство управления (УУ) / Регулятор — устройство (аппаратное, аппаратно-программное или программное решение), обеспечивающее поддержание регулируемого параметра (X) в соответствии с заданным (SP) по определенному алгоритму управления. Результат работы регулятора — это выдача управляющего воздействия в виде сигнала для ИМ.

Таким образом,

Система автоматического управления (САУ) — динамическая система, стремящаяся сохранить в допустимых пределах отклонения между уставкой и контролируемым параметром при помощи их сравнения на основе принципа обратной связи и воздействия на исполнительные механизмы.

КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ С ЗАМКНУТЫМ КОНТУРОМ



где, SP — уставка

- X — обратная связь (отрицательная)

E — рассогласование

Y — регулирующее воздействие с регулятора (число)

Y' — регулирующее воздействие с преобразователя сигнала (ПС, например, 4-20 мА)

Y'' — регулирующее воздействие с ИМ, влияющее на регулируемый параметр

Z — внешние воздействия

X — регулируемый параметр

$$E = SP + (-X)$$

В процессе работы САУ сравнивает текущее значение регулируемого параметра (X) с уставкой (SP) и устраняет рассогласование (E) — приводит его к нулевому значению, формируя соответствующее регулирующее воздействие (Y), которое, в свою очередь, подается на исполнительный механизм объекта управления. Внешние возмущающие воздействия Z также устраняются регулятором. Если рассогласование равно нулю, то никакого управления не требуется.

Например, при регулировании температуры в печи, уставкой (SP) является требуемая температура воздуха, регулируемым параметром (X) — текущая температура в печи, рассогласованием (E) — их разница, регулирующим воздействием (Y) является напряжение, подаваемое на исполнительный механизм — нагревательный элемент (например, ТЭН).

Такая схема называется также — **управление по ошибке (отклонению, рассогласованию)**. Для того, чтобы регулятор начал действовать, необходимо, чтобы контролируемый параметр (X) отклонился от заданного значения.

Можно ли управлять объектом так, чтобы не было ошибки? В реальных системах — нет.

Прежде всего, из-за внешних воздействий и шумов, которые заранее неизвестны. Кроме того, объекты управления обладают инерционностью, то есть, не могут мгновенно перейти из одного состояния в другое. Возможности регулятора и приводов (то есть мощность сигнала управления) всегда ограничены, поэтому быстродействие системы управления (скорость перехода на новый режим) также ограничена.

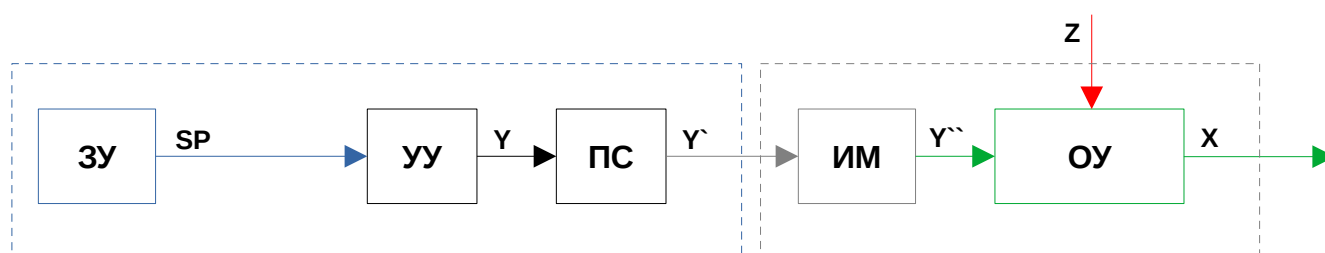
КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ С ЗАМКНУТЫМ КОНТУРОМ

В рассмотренном варианте обратная связь используется для уменьшения разницы между заданным и фактическим состоянием объекта управления. Такая обратная связь называется **отрицательной обратной связью**, потому что сигнал обратной связи вычитается из задающего сигнала. Может ли быть наоборот? Да. В этом случае обратная связь называется положительной, она увеличивает рассогласование, то есть, стремится «раскачать» систему. На практике положительная обратная связь применяется, например, в генераторах для поддержания незатухающих электрических колебаний.

КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ С РАЗОМКНУТЫМ КОНТУРОМ



где, SP — уставка

Y — регулирующее воздействие с регулятора (число)

Y' — регулирующее воздействие с преобразователя сигнала (ПС, например, 4-20 мА)

Y'' — регулирующее воздействие с ИМ, влияющее на регулируемый параметр

Z — внешние воздействия

X — регулируемый параметр

В процессе работы оператор анализирует (визуально) значение регулируемого параметра (X) (например, на технологическом индикаторе), и при необходимости, с помощью ручного задатчика, устанавливает необходимый регулирующий сигнал (Y), который приведет значение (X) в соответствие уставке (SP). Внешние возмущающие воздействия Z также устраняются оператором, вручную.

Например, при ручном регулировании температуры в печи, задающим воздействием (SP) является сигнал с ручного задатчика, регулируемым параметром (X) - текущая температура в печи, регулирующим воздействием (Y) - является напряжение, подаваемое с ручного задатчика на нагревательный элемент (например, ТЭН).

Можно ли управлять, не используя обратную связь? В принципе, можно. В случае автоматизации такой схемы, регулятор не будет получать информации о реальном состоянии объекта, поэтому должно быть точно известно как это объект себя ведет — только тогда можно рассчитать, как им нужно управлять. Однако, при этом, нельзя гарантировать, что задание будет выполнено (слепой и глухой водитель тоже может вести машину некоторое время, пока он помнит дорогу и может рассчитать свое местоположение и пока на пути не встретятся пешеходы или другие машины, о которых он заранее не может знать). Без обратной связи невозможно учесть влияние неизвестных факторов. С точки зрения теории управления разомкнутые системы неточны и малоинтересны.

КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

КЛАССИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ

По характеру протекания технологического процесса

- Циклические, периодические
- Непрерывно-циклические
- Непрерывные

По характеру установившегося значения выходной величины объекта

При подаче на вход объекта ступенчатого (пробного) сигнала

- С самовыравниванием
- Без самовыравнивания

По структуре объекта

- Без запаздывания
- С запаздыванием

По количеству входов и выходов и их взаимосвязи

- Одномерные
 - один вход и один выход
- Многомерно-многосвязные
 - наблюдается взаимное влияние технологических параметров друг на друга
- Многомерно-несвязные
 - взаимосвязь между каналами которых мала

По виду статических характеристик и характеру и математических соотношений

- Линейные
- Нелинейные

По поведению в статическом режиме

- Статические
- Астатические

По распределенности

- Локальные
- Распределенные

По типу стационарности

- Стационарные
 - параметры объекта с течением времени не изменяются
- Нестационарные
 - параметры объекта с течением времени изменяются
химический реактор с катализатором, активность которого со временем падает
летательный аппарат, масса которого изменяется по мере расхода топлива

По зависимости от интенсивности действия случайных возмущений

- Стохастические (непредсказуемый, неопределенный)
- Детерминированные (предсказуемый, определенный)

КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

КЛАССИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ

По направлению действия

- Прямое (нормального) действия
- Обратного (реверсивного) действия

По способности запасать (аккумулировать) рабочую среду

- Неёмкостные
- Ёмкостные

КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

По изменению задания (уставки)

- Стабилизирующие
 - уставка постоянная
 $X = SP = const$
- Программные
 - уставка изменяется по функции от времени (программные задатчики)
 $X = SP = f(t)$
- Следящие
 - уставкой является значение другого изменяющегося во времени параметра
 $X = X_n$
- С управлением по интерфейсу
 - уставка заранее не известна, передается по интерфейсу

По количеству контуров

- Одноконтурные
- Многоконтурные

По количеству контролируемых параметров

- Однокомпонентные
 - один регулируемый параметр (X)
- Многокомпонентные несвязанные
 - несколько несвязанных друг с другом регулируемых параметров (X_1, X_2, \dots, X_n)
- Многокомпонентные связанные
 - несколько связанных друг с другом регулируемых параметров (X, X', \dots, X'')

По функциональному назначению

- Специализированные
 - с неунифицированными сигналами
- Универсальные
 - с унифицированными сигналами

По характеру управляющих сигналов (по роду действия)

- Дискретные
 - релейные
 - импульсные
 - цифровые
- Непрерывные
 - аналоговые
 - релейные
 - импульсные
 - цифровые

КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

По характеру математических соотношений

- Линейные
 - для которых справедлив принцип суперпозиции
- Нелинейные
 - для которых несправедлив принцип суперпозиции

По типу выполняемых функций

- Системы контроля
- Системы блокировки
- Системы защиты
- Системы сигнализации
- Системы регулирования
- Системы управления

По виду используемой для регулирования энергии

- Электрические
- Пневматические
- Гидравлические
- Механические
- Комбинированные

По принципу регулирования

- По рассогласованию
- По отклонению
- По возмущению
- Комбинированные

По закону регулирования или логике работы контура

- Двухпозиционные
- Трехпозиционные
- П, PI, PID
- ШИМ
- Адаптивные
 - авто-, самонастраивающиеся
- Оптимальные
 - с оптимальным законом управления

По направлению действия

- Прямые
- Обратные

По принципу действия

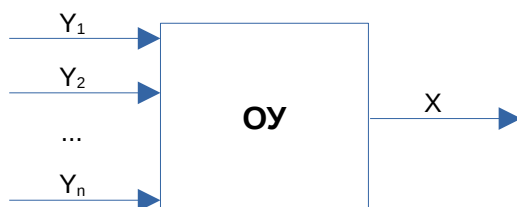
- Прямого действия
 - для работы используется энергия (среда) самого объекта управления
- Непрямого действия
 - для работы используется внешний источник энергии

КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

ПРИНЦИП СУПЕРПОЗИЦИИ

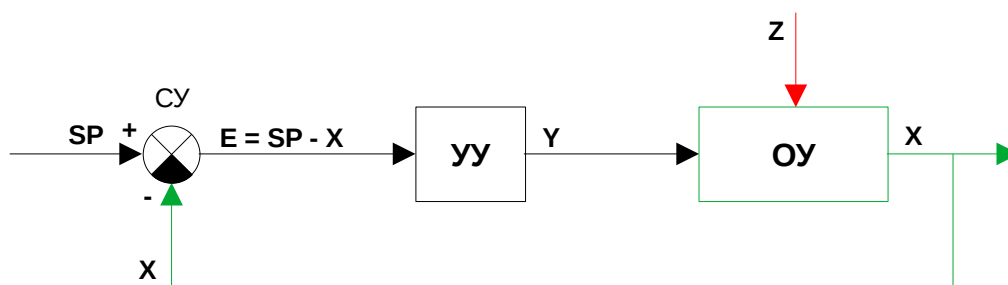
Если на вход объекта подается несколько входных воздействий (или возмущений), то реакция объекта на сумму входных воздействий равна сумме реакций объекта на каждое воздействие в отдельности.

Например: нагреваем кирпич и измеряем его температуру. Греем от заженной спички, от газовой горелки — на выходе полученная суммарная температура от этих воздействий.

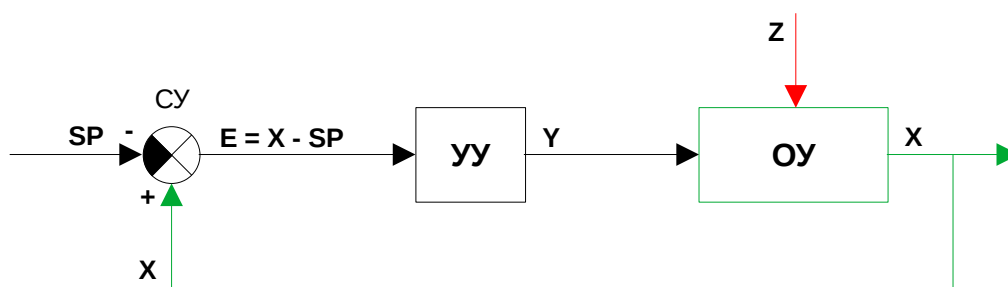


КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

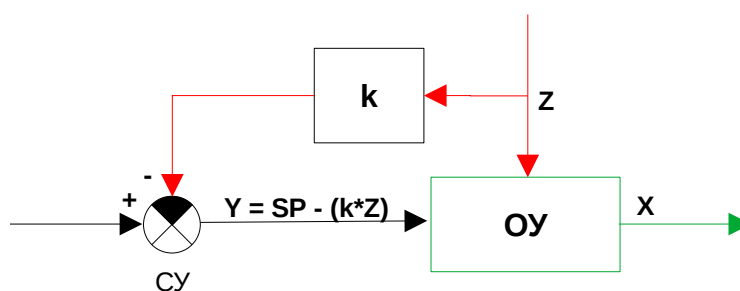
ПРИНЦИПЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ



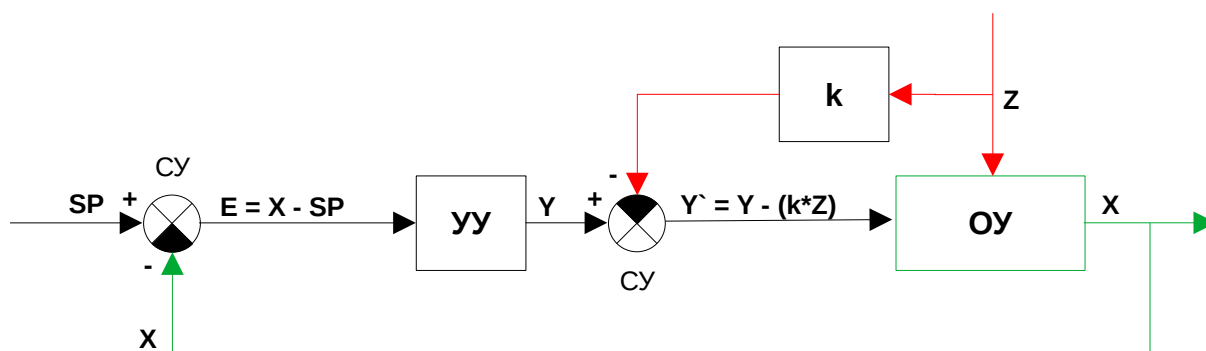
регулирование по рассогласованию



регулирование по отклонению



*регулирование по возмущению / компенсация
(где, k — коэффициент усиления)*



регулирование комбинированное

КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

ТРЕБОВАНИЯ К ПРОМЫШЛЕННЫМ СИСТЕМАМ РЕГУЛИРОВАНИЯ

К регуляторам предъявляют определенные требования, относящиеся к качеству процесса регулирования.

Показателями качества процесса регулирования являются:

- **Точность** (в установившемся режиме)
 - должно поддерживаться заданное выходное значение (Y)
 - рассогласование (E) должно быть в пределах допуска
- **Быстродействие**
- **Характер переходного процесса**
 - колебательный
 - апериодический
- **Величина перерегулирования**
- **Устойчивость**
 - система должна быть устойчивой на всех режимах
- **Качество переходных процессов**
 - при смене уставки система должна переходить в заданное состояние (по возможности) быстро и плавно
- **Робастность**
 - система должна быть устойчива к различного рода внешним воздействиям (выбросам и помехам)

Для оценки качества регулирования используются:

- **Статическая характеристика**
- **Динамическая характеристика**

Все эти условия будут выполняться, если объект управления является стационарным, либо его вариации параметров достаточно малы и компенсируются запасами устойчивости системы.

Современные промышленные регуляторы обеспечивают устойчивый процесс регулирования подавляющего большинства промышленных объектов при условии, что правильно выбраны настройки регулятора.

Чем выше требования к качеству регулирования, тем более сложной и дорогой будет система.

При создании САР стремятся найти разумный компромисс между качеством регулирования и затратами на автоматизацию технологического процесса.

КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Статическая характеристика - зависимость регулируемого параметра (X) от одного из возмущающих воздействий (Y или Z) в установившемся режиме.

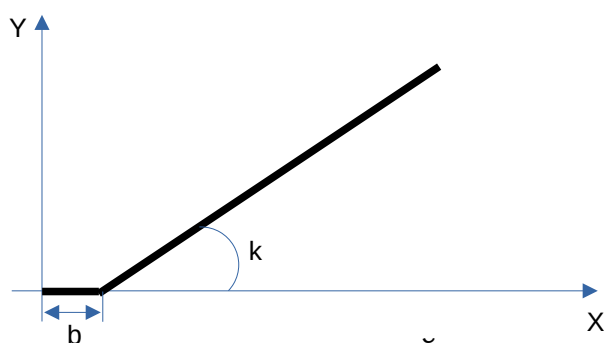
Статическая характеристика определяет, насколько точно регулятор поддерживает регулируемую величину или изменяет ее по определенному закону при возникновении возмущающих воздействий.

Статическая характеристика может быть представлена:

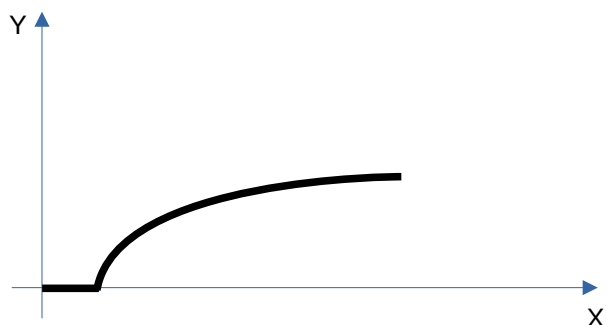
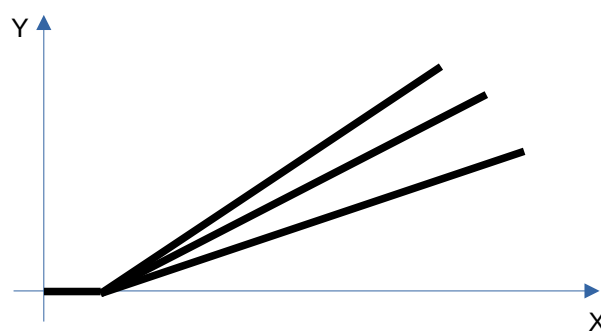
- одной линией (если одно возмущающее воздействие)
- семейством линий (если несколько возмущающих воздействий)

Линия характеристики может быть:

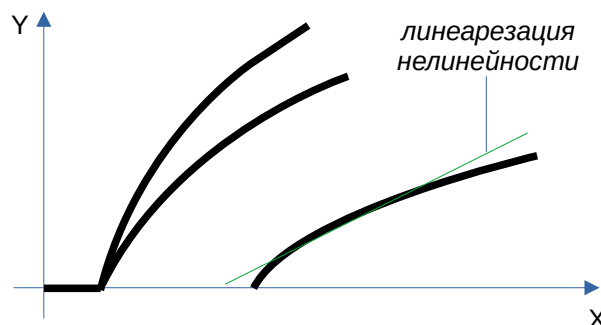
- прямая (линейная характеристика)
- кривая (нелинейная характеристика)



линейные статические характеристики



нелинейные статические характеристики



Линейные характеристики удобны и просты для изучения и работы и выражаются линейным уравнением вида:

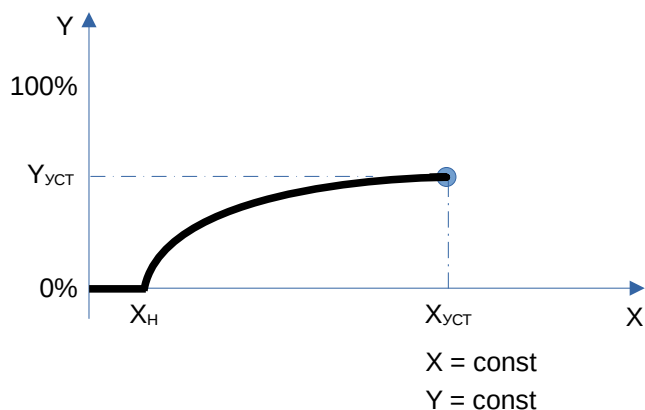
$$Y = (k \cdot X) + b$$

В общем случае (реальные) объекты являются нелинейными. Нелинейные характеристики выражаются сложными нелинейными уравнениями (функциями). В целях упрощения нелинейные уравнения заменяют линейными, которые приблизительно описывают динамический процесс объекта. Процесс замены нелинейной функции линейной называется **Линеаризацией**. Для линеаризации применяются специальные математические методы (например, плавную кривую можно аппроксимировать прямой линией). При линеаризации теряется точность, но ее достаточно для решения многих технических задач.

КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Установившийся режим — режим, при котором значения управляющего воздействия (Y) и контролируемого параметра (X) постоянны во времени.



$Y_{уст}$ — управляющее воздействие в установившемся режиме

$X_{уст}$ — контролируемый параметр в установившемся режиме

X_n — начальное значение контролируемого параметра

$X = \text{const}$

$Y = \text{const}$

статическая характеристика

Коэффициент передачи (K) — характеризует степень изменения регулируемого параметра (X) в зависимости от возмущающего воздействия (Y или Z). Иными словами, коэффициент передачи определяет наклон характеристики. В некоторых источниках коэффициент передачи называют — **Коэффициент статизма**.

$$K = \frac{X}{Y}$$

Если размерности X и Y (в общем случае) не совпадают (например, управляющее воздействие в виде унифицированного токового сигнала 4-20 мА и регулируемый параметр в виде температуры °C), то коэффициент передачи называют — **Коэффициент преобразования** и выражают в полученных единицах (°C/мА).

Если размерности X и Y совпадают, то коэффициент передачи называют — **Коэффициент усиления** и он является безразмерной величиной.

КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Динамические характеристики — свойства объекта управления, определяющие особенности его переходного процесса под воздействием различных возмущающих факторов.

К динамическим свойствам объекта относятся:

- Емкость
- Самовыравнивание
- Переходный процесс
- Перерегулирование
- Коэффициент колебательности
- Коэффициент затухания колебаний
- Установившийся процесс
- Динамический коэффициент усиления
- Временные характеристики
 - емкостное запаздывание
 - транспортное запаздывание
 - полное запаздывание
 - время разгона
 - постоянная времени объекта
 - длительность переходного процесса (регулирования)
- Максимальная скорость изменения регулируемого параметра
- Устойчивость системы

КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Статический объект — объект, у которого при постоянном возмущающем воздействии (Y и/или Z) с течением времени устанавливается постоянный регулируемый параметр (X). Это связано с эффектом самовыравнивания данных объектов.

Статическим может быть как отдельный элемент объекта управления, так и весь объект управления в целом.

Емкость (C) — запас накопленной энергии или вещества в объекте (например, тепло в кладке печи). Величина емкости зависит от размеров объекта.

В объекте большой емкости регулируемый параметр (X) при регулирующем воздействии (Y) меняет свое значение медленнее, регулирование протекает более устойчиво (плавно) — нет чрезмерно быстрых изменений при нарушении баланса между притоком и расходом рабочей среды.

От величины емкости зависят динамические временные характеристики.

Коэффициент емкости (K_c) — количество энергии (или вещества), которое необходимо подвести к объекту, чтобы изменить значение регулируемого параметра (X) на единицу измерения. Этот коэффициент может быть как постоянным, так и переменным.

$$K_c = \frac{C}{X}$$

Самовыравнивание — способность объекта самостоятельно, без участия регулятора, входить в новый, установившийся режим работы. Если объект обладает свойством самовыравнивания, то он является статическим. Другие объекты (элементы) — астатические.

Коэффициент самовыравнивания (ρ) — способность объекта к самовыравниванию:

$$\rho = \frac{dQ}{dX_0} \quad dQ = Q_{\text{IN}} - Q_{\text{OUT}} \quad dX_0 = \frac{X}{X_H}$$

где,

dQ — относительная разность между приходом и расходом вещества или энергии

dX_0 — отношение текущего значения (X) к номинальному (X_H)

Чем выше ρ , тем меньше время переходного процесса и выше качество объекта.

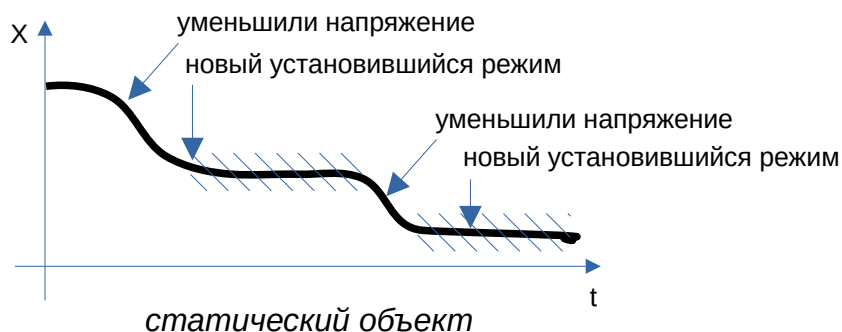
Инерционность — способность объекта к замедлению накопления или расходования энергии (вещества) из-за наличия различных сопротивлений.

КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Пример (1) статического объекта с самовыравниванием:

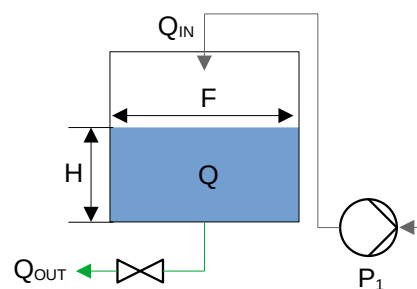
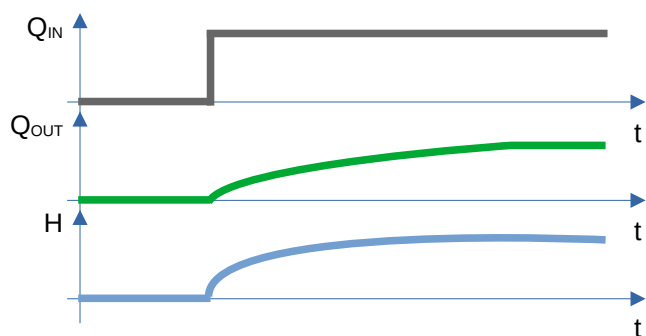
Печь с электрогревательным элементом (ТЭН). Если уменьшить напряжение, то нагревательные элементы будут меньше нагревать печь, температура в печи уменьшится и достигнет нового установившегося значения.



Пример (2) статического объекта с самовыравниванием:

В бак с помощью насоса P_1 поступает некоторое количество воды Q_{IN} (вход). Некоторое количество воды Q_{OUT} (выход) вытекает из бака. Бак имеет площадь сечения F . Регулируемой величиной является уровень H , который необходимо поддерживать.

При увеличении подачи Q_{IN} уровень H начнет повышаться. Однако, вследствие увеличения гидростатического напора (давления) одновременно начнет увеличиваться и количество вытекающей воды Q_{OUT} . Через некоторое время наступит равновесие между притоком и стоком: $Q_{IN} = Q_{OUT}$ - дальнейшее повышение уровня в баке прекратится. Таким образом, нарушенное равновесие между притоком и стоком восстанавливается (самовыравнивается) без участия какого-либо регулятора.



Статические объекты имеют более простую конструкцию.

Наличие самовыравнивания в объекте благоприятно сказывается на процессе автоматического регулирования!

Управлять статическим объектом проще, чем астатическим!

КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

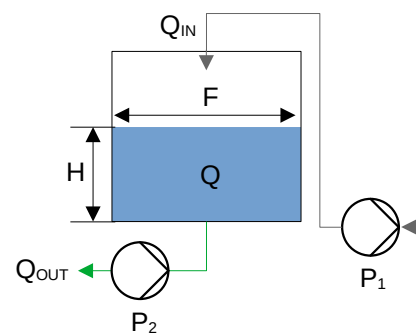
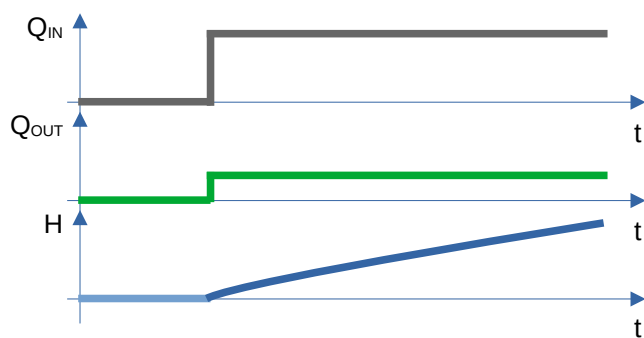
ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Астатический объект — объект, у которого при постоянном возмущающем воздействии (Y и/или Z) регулируемый параметр (X) непрерывно растет с постоянной скоростью и ускорением. Астатические объекты не обладают эффектом самовыравнивания.

Пример астатического объекта

В бак с помощью насоса P_1 поступает некоторое количество воды Q_{IN} (вход). Некоторое количество воды Q_{OUT} (выход) откачивается из бака насосом P_2 . Бак имеет площадь сечения F . Регулируемой величиной является уровень H , который необходимо поддерживать.

Повышение производительности подающего насоса P_1 не отразится на производительности откачивающего насоса P_2 . Уровень воды в баке будет непрерывно повышаться до тех пор, пока это повышение не нарушит нормальную работу объекта (произойдет перелив) или пока внешним воздействием (вручную или автоматически) не будет увеличена производительность откачивающего насоса P_2 (или уменьшена производительность P_1). Таким образом, подобный объект лишен способности к самовыравниванию и является астатическим.



Астатические объекты имеют сложную конструкцию.

Отсутствие самовыравнивания в объекте требует применение устройств управления (регулятор) для достижения устойчивых показателей работы.

Управлять астатическим объектом сложнее, чем статическим, но здесь главное — правильно выбрать устройство управления. Хотя, бывают случаи, когда ни один регулятор не может справиться с динамикой астатического объекта, тогда приходится упрощать (или качественно улучшать) конструкцию самого объекта.

КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

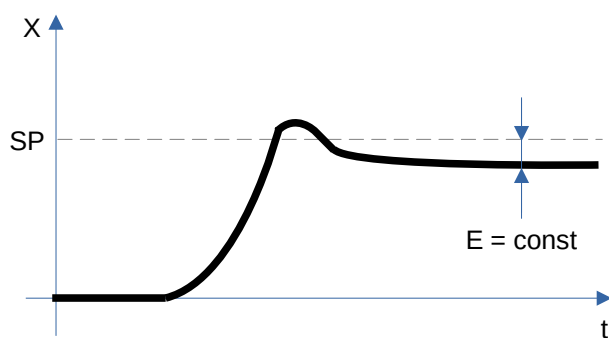
ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

В то же время, выделяют статизм и астатизм для устройств управления (регулятор).

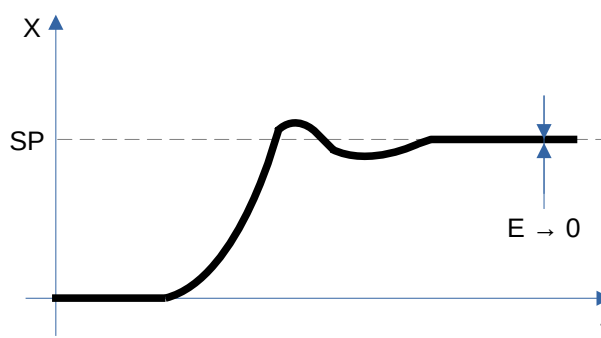
При этом, статизм и астатизм регулятора противоположны по определению статизму и астатизму объекта (объекта управления).

Статическое устройство управления (регулятор) — система управления, у которой при постоянном входном воздействии ошибка регулирования (E) стремится к постоянному значению, зависящему от величины воздействия (Y). В таких системах ошибка регулирования никогда не достигнет требуемого нулевого значения и, соответственно, регулируемый параметр (X) не достигнет уставки (SP).

Астатическое устройство управления (регулятор) — система управления, у которой при постоянном входном воздействии (Y) ошибка регулирования (E) стремится к нулю вне зависимости от величины воздействия — регулируемый параметр (X) достигнет уставки (SP) и будет удерживаться в этом положении.



статическая система управления



астатическая система управления

Переходный процесс - это переход системы от одного установившегося режима к другому при каких-либо входных воздействиях. Переходный процесс характеризует динамические свойства и поведение системы.

Динамические характеристики систем и объектов определяются по графику переходной характеристики (**Кривая разгона**).

Перерегулирование (σ) - ограниченный по времени выброс сигнала над целевым значением (уставкой). Перерегулирование зачастую сопровождается затухающими колебаниями и переходит к установившемуся процессу. Большое перерегулирование вызывает чрезмерные усилия в механических узлах и перенапряжения в электрических узлах исполнительных механизмов. Для работы системы автоматики без нарушений разрешается перерегулирование в пределах 10...30% SP.

$$\sigma = \frac{(X_{\text{MAX}} - X_{\text{УСТ}}) \cdot 100 \%}{X_{\text{УСТ}}}$$

где, X_{MAX} — максимальное отклонение значения регулируемого параметра

$X_{\text{УСТ}}$ — установившееся значение регулируемого параметра

КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Длительность переходного процесса / регулирования (τ_p). Теоретически переходный процесс длится бесконечно долго, однако практически считают, что он заканчивается, как только отклонение регулируемой величины от нового ее установившегося значения не будут превышать допустимых пределов ($D = 3\text{-}5\% \text{ SP}$). Время регулирования характеризует быстродействие системы.

Зона нечувствительности / Зона гистерезиса (Dead zone, D) — допустимые пределы установившегося процесса. В зависимости от типа регулятора, в этой зоне регулятор не выдает никаких сигналов на ИМ (работа объекта стабилизируется за счет накопленной энергии), либо только здесь работает ИМ (объект накапливает энергию, переданную ИМ).

Коэффициент колебательности (M) — количество колебаний регулируемой величины (X) около ее установившегося значения за время успокоения.

Нормальный регулируемый процесс — процесс, у которого число колебаний регулируемой величины не превышает одного-двух ($M = 1\text{...}2$).

Статическая ошибка (δ) - отклонение регулируемого параметра ($X_{уст}$) от заданного значения (SP) после окончания переходного процесса (в установившемся режиме).

Система автоматики считается качественной если $\delta \leq 5\%$.

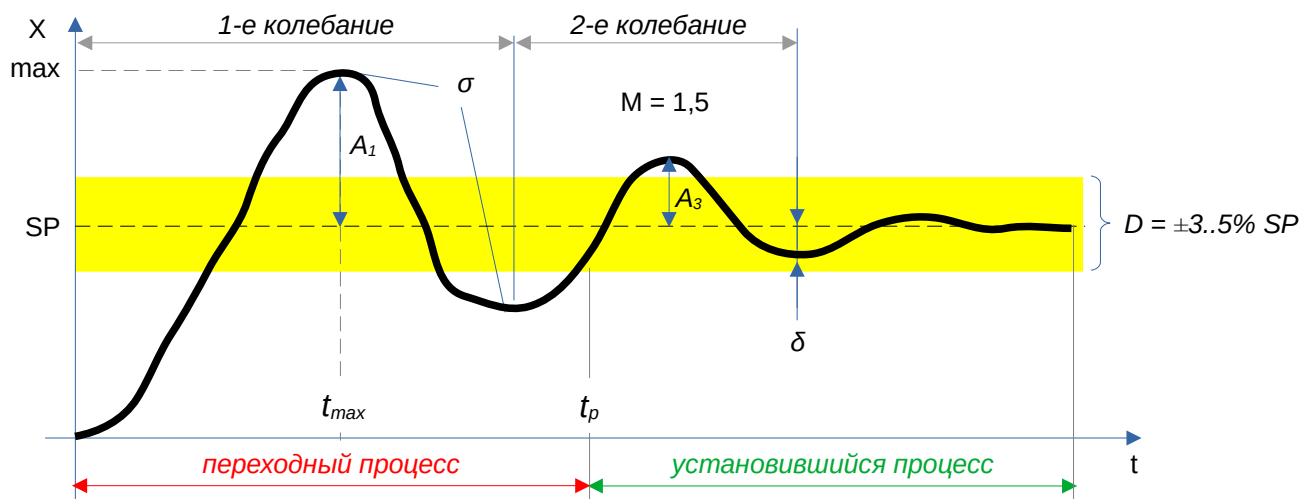
$$\delta = \frac{(SP - X_{уст}) \cdot 100\%}{SP}$$

Установившийся процесс - это равновесный процесс при постоянных воздействиях (цель регулирования).

Коэффициент затухания (ψ) определяется по следующей формуле:

$$\psi = \frac{A_1 - A_3}{A_3}$$

Время достижения первого максимума (t_{max}) определяется по переходной характеристике.



КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

В системах регулирования после получения возмущающего воздействия (Y и/или Z) регулируемый параметр (X) изменяется не мгновенно, а через некоторое время.

Запаздывание (τ) - отставание регулируемой величины (X) от реального изменения расхода (накапливания) энергии (вещества). Запаздывание необходимо учитывать при регулировании, если им пренебречь, то можно получить в итоге очень большое перерегулирование (большой выброс).

Транспортное запаздывание (τ_T) - время, в течение которого регулируемая величина не изменяется, несмотря на изменение регулирующего воздействия. Например, из-за того, что датчик температуры не сразу реагирует на изменение температуры объекта (низкая скорость реакции чувствительного элемента или большой зазор между чувствительным элементом и объектом измерения).

Чем ближе датчик к объекту, тем меньше $\tau_T \downarrow$.

Чем больше нагрузка (количество электроэнергии), тем меньше $\tau_T \downarrow$.

Чем больше емкость (объем) объекта регулирования, тем больше $\tau_T \uparrow$.

Емкостное запаздывание (τ_E) - время, затрачиваемое на преодоление межъемкостного сопротивления внутри объекта. Величина емкостного запаздывания зависит от сопротивления объекта (гидравлического, механического). Например, объект обладает большой емкостью и эффект от регулирующего воздействия еще не подействовал. Характерно для вялотекущих процессов (регулирование кислотности — повышение pH в среде происходит не быстро, регулирование температуры больших / объемных объектов). Паровой котел полный воды имеет емкостное запаздывание по температуре.

Время полного запаздывания (τ_n) — сумма транспортного и емкостного запаздываний:

$$\tau_n = \tau_T + \tau_E$$

Чем больше, время полного запаздывания τ_n - тем труднее регулировать такой процесс. Из наиболее часто регулируемых параметров наибольшим запаздыванием обладают объекты, в которых регулируется температура, а наименьшим - объекты, в которых поддерживается расход жидкости.

Постоянная времени объекта (T) – время разгона при отсутствии самовыравнивания. Для определения начала постоянной времени объекта по кривой разгона проводят касательную к кривой разгона из начальной точки этой кривой до установившегося значения (X).

Постоянная времени объекта достаточно точно может быть определена как время, за которое регулируемая величина (X) достигнет значения $0,63 \cdot SP$ минус τ_T :

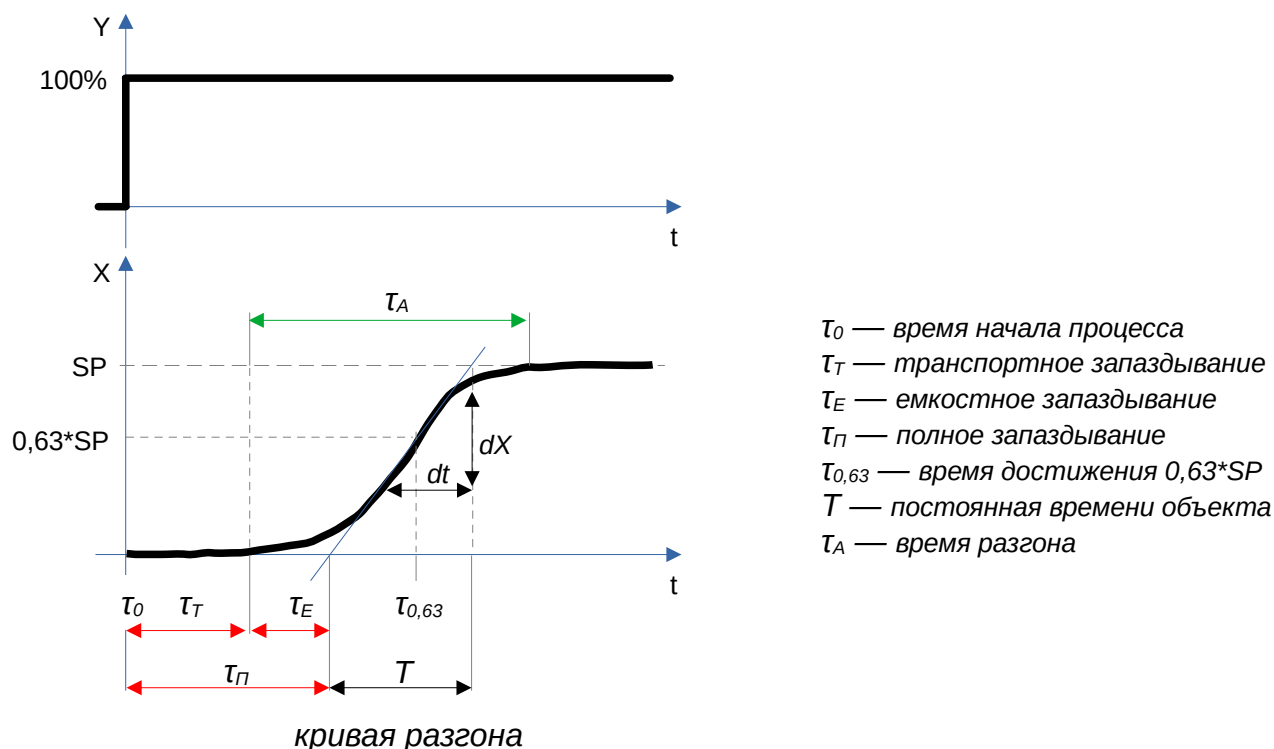
$$T = \tau_{0,63} - \tau_T$$

Чем больше постоянная времени объекта, тем хуже объект поддается регулированию.

Чем больше число емкостей объекта, тем больше постоянная времени объекта.

КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ



Время разгона (τ_A) — время, в течение которого регулируемая величина (X) изменяется от нуля до уставки при максимальном регулирующем воздействии ($100\% Y$) и последующем постоянстве этого воздействия.

Время разгона является мерой инерционности объекта и увеличивается при увеличении емкости объекта регулирования.

Для определения времени разгона строят кривую разгона, которая показывает изменение регулируемой величины X во времени. Время разгона можно вычислить по формуле:

$$\tau_A = \eta \cdot T$$

где, η — коэффициент нагрузки объекта

T — постоянная времени объекта

Нагрузка (η) — количество энергии или вещества, которое расходуется в объекте для проведения заданного технологического процесса (например, электрическая энергия на нагревание печи, количество топлива, подаваемого к горелкам и т.п.).

Значительные колебания нагрузки ведут к изменению регулируемого параметра (X).

Чем медленнее изменяется нагрузка и чем меньше ее диапазон, тем легче регулировать объект (т. е., чем меньше изменяется количество топлива, тем легче регулировать температуру в печи).

Максимальная скорость изменения регулируемого параметра (R) определяющийся по следующей формуле:

$$R = \frac{X_{уст}}{T}$$

где, $X_{уст}$ — установившееся значение регулируемого параметра

T — постоянная времени объекта

КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Динамический коэффициент усиления (K) — величина, показывающая, степень изменения регулируемого параметра в установившемся режиме ($X_{уст}$) в зависимости от возмущающего воздействия (Y):

$$K = \frac{X_{уст}}{Y}$$

Коэффициент усиления для объекта с самовыравниванием является величиной, обратной коэффициенту самовыравнивания (ρ):

$$K = \frac{1}{\rho}$$

Коэффициент усиления для объекта без самовыравнивания определяется как отношение установившейся скорости изменения регулируемого параметра (X) к величине регулирующего воздействия (Y):

$$K = \frac{\left(\frac{dX}{dt}\right)}{Y}$$

Для регуляторов с релейным выходом на объект подается 100% мощности (нагрузки). В ряде случаев длительное воздействие такой мощности недопустимо. В этом случае допускается выключать выход по достижении $0,3 \cdot X$. Для подобных регуляторов значения R и T могут быть вычислены по следующим формулам:

$$R = \frac{dX}{dt} \quad T = \frac{X_{уст}}{R}$$

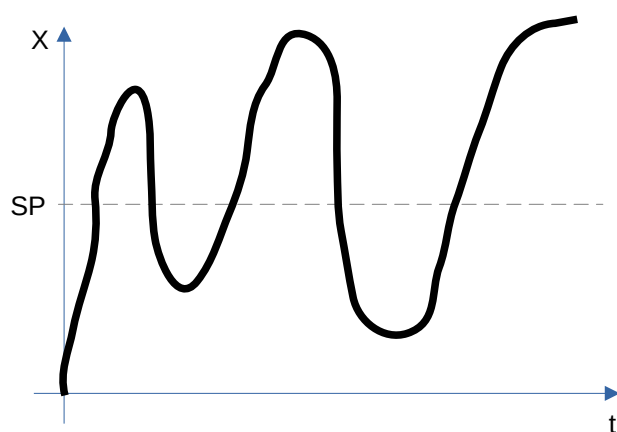
КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

КРИТЕРИИ УСТОЙЧИВОСТИ И КАЧЕСТВА СИСТЕМЫ

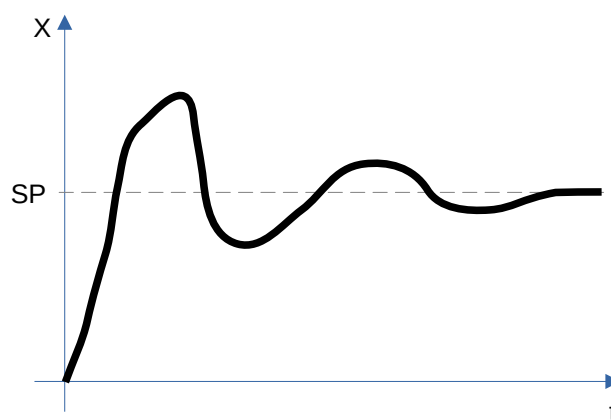
Необходимым условием работоспособности любой системы автоматики является ее устойчивость.

Устойчивая система - система, которая после прекращения действия возмущающих факторов (Y и/или Z) стремится к исходному или новому устойчивому состоянию, т.е. переходные процессы в ней являются затухающими.

Устойчивость системы можно определить экспериментально (построив переходную характеристику), с помощью вычислений (решить дифференциальное уравнение, описывающее эту систему), по лагорифмическим частотным характеристикам (ЛАЧХ).



неустойчивая система



устойчивая система

Пригодность системы автоматики также определяется по критериям качества переходных процессов.

Качественная система — система, которая может поддерживать заданный закон изменения регулируемого параметра (X) с достаточной точностью и быстродействием.

Базовые показатели качества

Наименование показателя	Обозначение	Предел допустимых значений
Перерегулирование	σ	$\pm 10...30\% \text{ SP}$
Зона нечувствительности	D	$\pm 3...5\% \text{ SP}$
Коэффициент колебательности	M	1...2
Статическая ошибка	δ	$\leq 5\%$

КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СВОЙСТВ И ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ

Базовые методы

Методы получения свойств и характеристик систем управления:

- Аналитический
 - использование уравнений (в том числе сложных - дифференциальных)
- Экспериментальный
 - проведение серии экспериментов / замеров на реальном объекте
- Комбинированный
 - проведение серии экспериментов и замеров на реальном объекте
 - полученные в ходе экспериментов данные используют при анализе: вычисляют / определяют свойства и характеристики системы

Методы описания свойств и характеристик систем управления:

- Точное математическое описание:
 - Статические характеристики
 - Динамические характеристики
 - Дифференциальные уравнения
 - Передаточные функции
 - Частотные характеристики
- Текстовое и/или табличное описание
 - + помогает понять принцип действия системы, назначение, функционирование
 - не дает количественных и качественных оценок регулирования

КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СВОЙСТВ И ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ

Метод анализа переходной характеристики

Для определения динамических свойств объекта на практике чаще всего используют методику снятия переходной характеристики — по касательной к точке перегиба кривой разгона (точка перегиба соответствует переходу кривой от режима ускорения к режиму замедления темпа нарастания выходного сигнала).

№ п.п.	Условие снятия переходной характеристики
1	Если проектируется система стабилизации технологического параметра, то переходная характеристика должна сниматься в окрестности рабочей точки процесса.
2	Переходную характеристику необходимо снимать как при положительных, так и отрицательных скачках управляющего сигнала. По виду кривых можно судить о степени асимметрии объекта. При небольшой асимметрии расчет настроек регулятора рекомендуется вести по усредненным значениям параметров передаточных функций. Линейная асимметрия наиболее часто проявляется в тепловых объектах управления.
3	При наличии зашумленного выхода желательно снимать несколько переходных характеристик (кривых разгона) с их последующим наложением друг на друга и получением усредненной кривой.
4	При снятии переходной характеристики необходимо выбирать наиболее стабильные режимы процесса, например, ночные смены, когда действие внешних случайных возмущений маловероятно.
5	При снятии переходной характеристики амплитуда пробного входного сигнала должна быть, с одной стороны, достаточно большой, чтобы четко выделялась переходная характеристика на фоне шумов, а, с другой стороны, она должна быть достаточно малой, чтобы не нарушать нормального хода технологического процесса.

№ п.п.	Начальные условия снятия переходной характеристики
1	Система должна находиться в состоянии покоя: <ul style="list-style-type: none">• регулируемый параметр (X) не должен изменяться• регулирующее воздействие (Y) не должно изменяться• исполнительный механизм не должен изменять своего положения (состояния)• внешние возмущения должны отсутствовать
2	На вход исполнительного механизма подать воздействие (например, включить нагреватель на полную мощность, открыть задвижку на 100%). В результате состояние объекта начнет изменяться.

КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

ТИПЫ РЕГУЛЯТОРОВ. ЗАКОНЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Из классификации систем регулирования выделяют следующие основные типы регуляторов и законов регулирования:

- Дискретные
- Непрерывные

Дискретные регуляторы

Регуляторы, у которых управляющий сигнал является дискретным (прерывистым во времени), а для его формирования используются в основном логические операции (сравнение), а математические операции ограничены простыми (сложение, вычитание; как таковые формулы, описывающие какой-либо закон регулирования, здесь отсутствуют). Входные величины, при этом, могут быть как дискретной, так и непрерывной формы.

Характеристика	Значение
Тип программного алгоритма для формирования управляющего сигнала (Y)	Логический = логические операции (сравнение) Математический = простые операторы (сложение, вычитание)
Форма описания закона управления	Диаграмма (статическая характеристика)
Тип управляющего сигнала (Y)	Логический = выкл / 0 / FALSE = вкл / 1 / TRUE
Тип канала вывода	Дискретный (DO) = релейный = транзисторный * нормальный и импульсный (ШИМ) режимы Цифровой интерфейс (NET) = RS-485 = ETHERNET = и т.п.
Тип исполнительных устройств	Дискретный = реле = контакторы = пускатели = и т.п. Цифровой = устройства плавного пуска = частотные преобразователи = и прочие интеллектуальные устройства

КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

ТИПЫ РЕГУЛЯТОРОВ. ЗАКОНЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Непрерывные регуляторы

Регуляторы (регуляторы непрерывного действия), у которых представление входных и выходных величин, а также выполнение всех вычислительных операций осуществляется в непрерывной форме.

Характеристика	Значение
Тип программного алгоритма для формирования управляющего сигнала (Y)	Логический = логические операции (сравнение) Математический = простые операторы (сложение, вычитание) = сложные операторы / функции (умножение, деление, возведение в степень, тригонометрические функции, логарифмы, работа с массивами данных)
Тип управляющего сигнала (Y)	Цифровой (с плавающей точкой) = 0.0 ... 100.0 %
Форма описания закона управления	Математическая формула
Тип канала вывода	Дискретный (DO) = релейный = транзисторный * нормальный и импульсный (ШИМ) режимы * цифровой управляющий сигнал преобразуется в дискретный с помощью специальных программных и аппаратных модуляторов Аналоговый (AO) * цифровой управляющий сигнал преобразуется в аналоговый с помощью программных функций масштабирования Цифровой интерфейс (NET) = RS-485 = ETHERNET = и т.п.
Тип исполнительных устройств	Дискретный = реле = контакторы = пускатели = и т.п. Аналоговый = позиционеры = задатчики скорости = и т.п. Цифровой = устройства плавного пуска = частотные преобразователи = и прочие интеллектуальные устройства

КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

ДВУХПОЗИЦИОННЫЙ РЕГУЛЯТОР

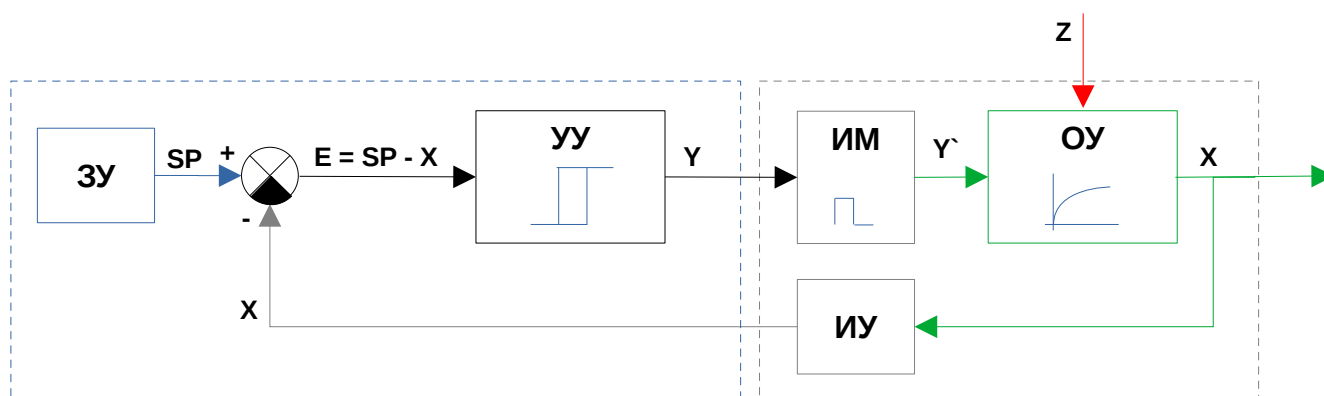
Двухпозиционный регулятор обеспечивает хорошее качество регулирования для инерционных объектов с малым запаздыванием, просты в эксплуатации и, практически, не требуют настроек.

Представляет обычный и наиболее широко распространенный метод регулирования.

Управляет переключательными (дискретными) исполнительными механизмами:

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

В простейшем случае (без обратной связи) двухпозиционный регулятор работает как двухпозиционный переключатель.

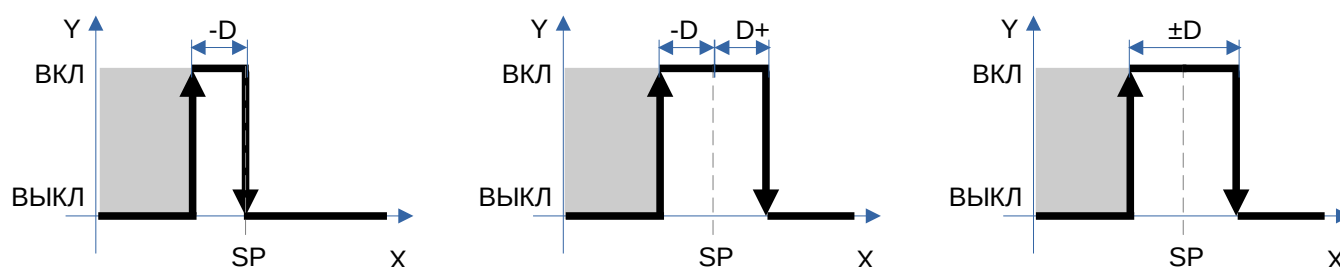


Пример

Мощность, подаваемая на нагреватель (ТЭН), имеет только два значения - максимальное и минимальное (нулевое), две позиции (отсюда и название регулятора - двухпозиционный) - нагреватель полностью включен или полностью выключен.

Зона гистерезиса

Для предотвращения «дребезга» (частого включения/выключения) управляющего выходного устройства (например, реле) и исполнительного механизма (например, нагревательного элемента) вблизи уставки (SP), предусматривается гистерезис — зона нечувствительности (D).



варианты представления зоны гистерезиса

КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

ДВУХПОЗИЦИОННЫЙ РЕГУЛЯТОР

Гистерезис (в некоторых типах регуляторов) может принимать как положительные, так и отрицательные значения. Отрицательные значения гистерезиса используются в основном для упреждения или задержки включения (выключения) выходных устройств, например:

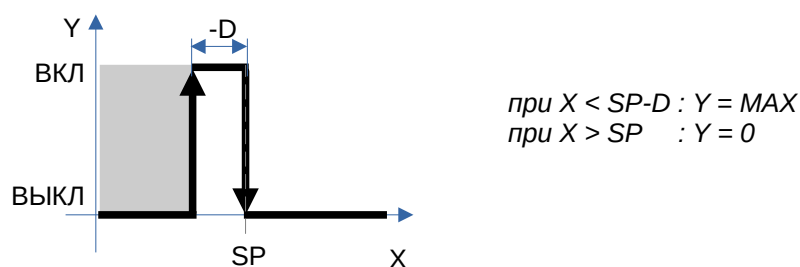
SP-D - включение выходного устройства по уставке с упреждением

SP+D - включение выходного устройства по уставке с задержкой

Гистерезис применяют для того, чтобы учесть инерционность объекта управления.

Базовый алгоритм регулирования

Базовый алгоритм двухпозиционного регулятора определяется статической характеристикой (зависимостью Y от X):



Настройки регулятора

Наименование	Обозначение	Предел допустимых значений
Уставка	SP	...
Зона нечувствительности	D	% SP

Переходной процесс регулятора

Процесс двухпозиционного регулятора — автоколебательный.

Регулируемый параметр (X) как в переходном, так и в установившемся режиме изменяется относительно уставки (SP) в виде незатухающих колебаний. При достаточной точности настройки регулятора можно получить часть колебаний в зоне нечувствительности (D), где исполнительный механизм находится в режиме ожидания (не работает).

Основные показатели процесса:

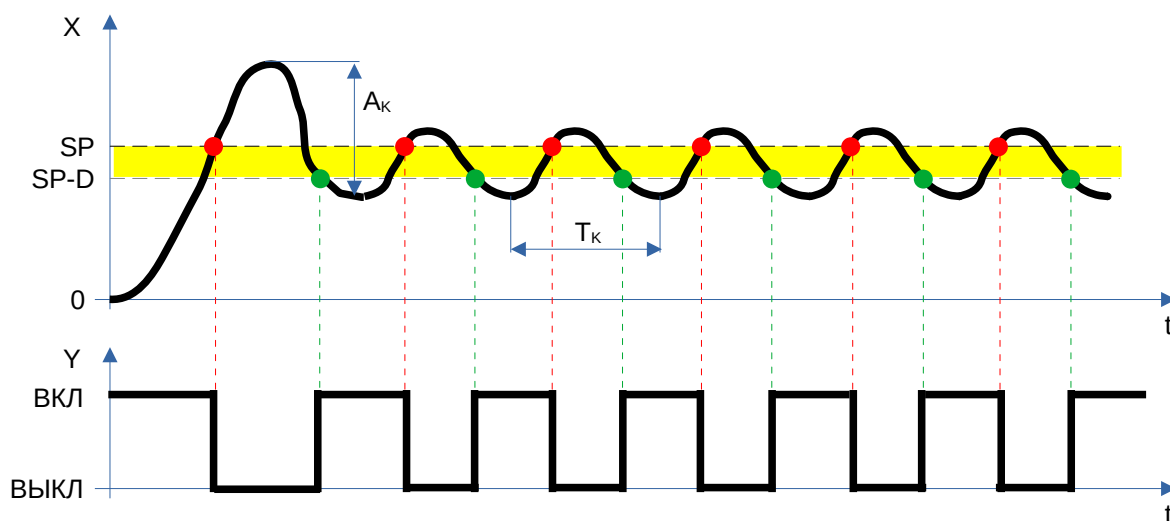
- Амплитуда колебаний (A_k)
 - чем меньше, тем лучше (меньше отклонение от уставки)
- Период колебаний (T_k)
 - чем больше, тем лучше (реже вкл/выкл ИМ)

Основные показатели процесса зависят от следующих характеристик объекта управления:

- временное запаздывания (τ)
(в том числе запаздывания переключающего элемента — например, реле)
- постоянная времени (T)
- максимальная скорость изменения X (R)

КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

ДВУХПОЗИЦИОННЫЙ РЕГУЛЯТОР



$A_k \uparrow$ (увеличивается), если:

- $D \uparrow$
- $(\tau / T) \uparrow$
- $R \uparrow$

$T_k \uparrow$ (увеличивается), если:

- $\tau \uparrow$
- $T \uparrow$

Точность регулирования X зависит от величины гистерезиса (D): чем меньше D , тем точнее регулирование, но тем чаще вкл/выкл управляющий элемент (больше его износ).

Уменьшая гистерезис можно повысить качество регулирования, но до некоторого предела, определяемого параметрами объекта управления.

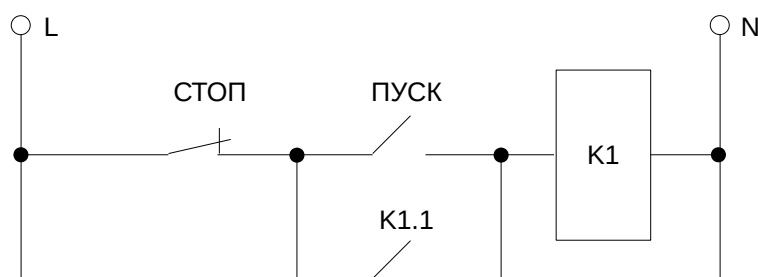
Импульсный режим управления

Двухпозиционный импульсный регулятор применяется для управления исполнительными механизмами путем подачи дискретных сигналов небольшой длительности (импульс).

Данный тип управления может быть использован в схемах, где исполнительным элементом является реле (контактор, пускатель) с самоблокировкой, т. е. с установкой на «самоподхват». Подобные схемы применимы для управления электродвигателями и насосами, например, чтобы не держать в длительном нагруженном состоянии каналы вывода того же ПЛК.

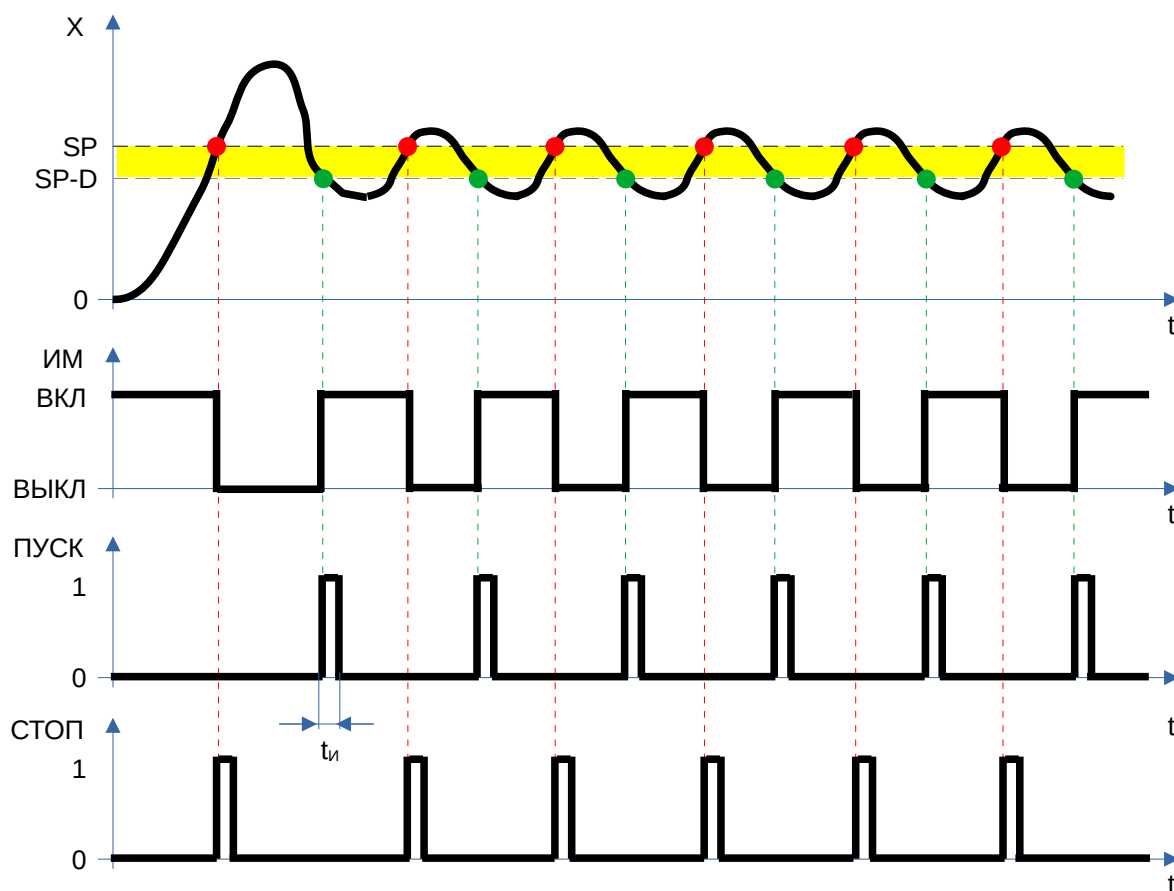
Если из схемы управления будет дана команда ПУСК определенной длительности (например, на 1-2 секунды), то замкнутся контакты ПУСК и включится реле $K1$ - замкнутся контакты $K1$ и управляющее реле $K1$ останется включенным (на самоподхвате).

Если из схемы управления будет дана команда СТОП определенной длительности (например, 1-2 секунды), то разомкнутся контакты СТОП и выключится управляющее реле $K1$ - разомкнутся контакты $K1$ и схема вернется в прежнее состояние.



КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

ДВУХПОЗИЦИОННЫЙ РЕГУЛЯТОР



Настройки регулятора в импульсном режиме

Наименование	Обозначение	Предел допустимых значений
Уставка	SP	...
Зона нечувствительности	D	% SP
Длительность управляющего импульса	$t_{и}$	зависит от исполнительного элемента

Достоинства двухпозиционного регулятора

- + Простота настройки
- + Простота реализации
- + Простота использования

Недостатки двухпозиционного регулятора

- Не применяется для объектов с существенным транспортным запаздыванием ($\tau_T > 0,2 T$)
- Не применяется для объектов без самовыравнивания (в данном случае регулируемый параметр будет выходить за допустимые пределы)

КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

ТРЕХПОЗИЦИОННЫЙ РЕГУЛЯТОР

Трехпозиционный регулятор обеспечивает хорошее качество регулирования для инерционных объектов с малым запаздыванием

Используется в системах:

- поддержание уровня различных веществ
- управление нагреванием-охлаждением тепловых процессов
- управление холодильными установками
- регулирование микроклимата
- управление распределением и смешиванием различных потоков

Управляет исполнительными механизмами с дискретным управлением:

- трехходовые клапаны
- краны
- смесители
- реверсивные электродвигатели
(со сменой направления вращения: вперед, назад)
- сервоприводы
(с удержанием момента, со сменой направления вращения: вперед, назад)
- шаговые двигатели
(с удержанием позиции, со сменой направления вращения: вперед, назад)

Управляет переключательными (дискретными) исполнительными элементами:

- электромеханическими реле
- контакторами
- транзисторными ключами
- симисторными или тиристорными устройствами
- твердотельными реле

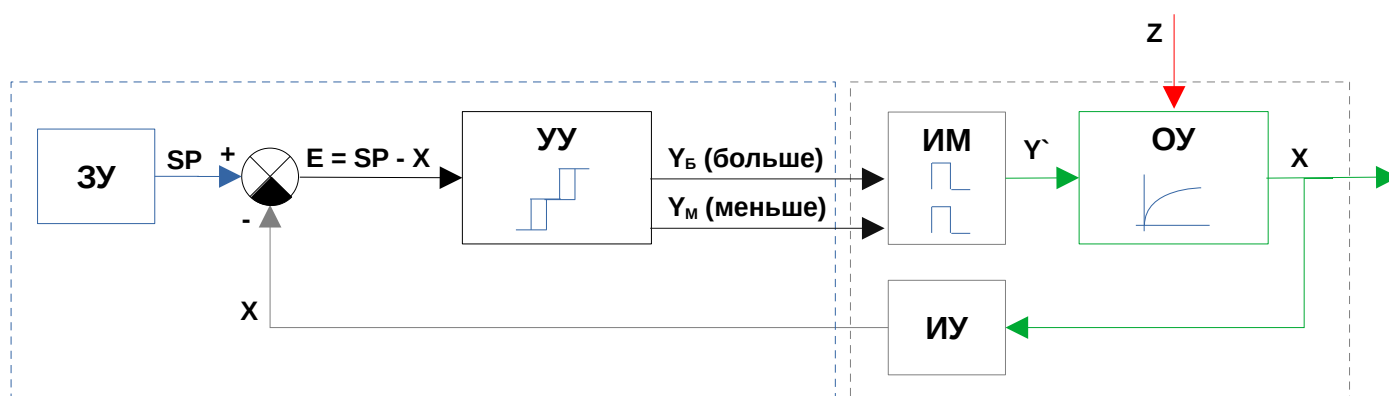
Регулятор имеет три режима / позиции работы (отсюда название — трехпозиционный):

1. «Больше» : когда $X < SP$, то выдача сигнала на ИМ для повышения X
2. «Норма» : когда $X = SP$, то сигнал на ИМ не подается
3. «Меньше»: когда $X > SP$, то выдача сигнала на ИМ для понижения X

Переключение между позициями (больше или меньше) может осуществляться по знаку рассогласования (E):

+E - «Больше»

-E - «Меньше»



КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

ТРЕХПОЗИЦИОННЫЙ РЕГУЛЯТОР

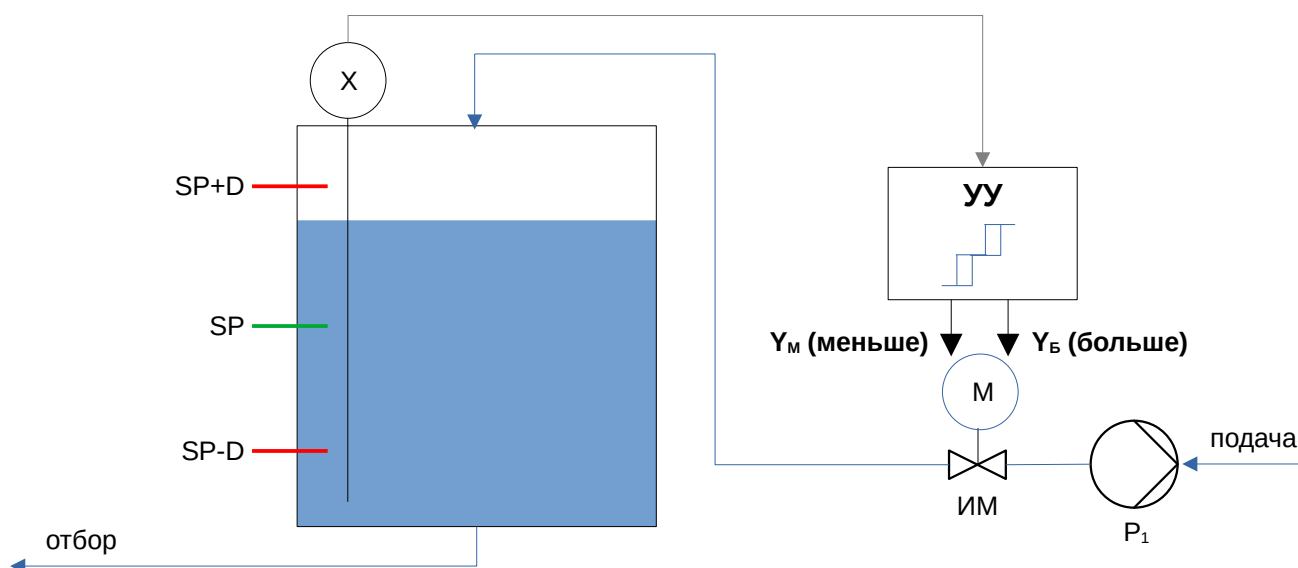
Пример

Принцип работы трехпозиционного регулятора рассмотрим на емкости с водой, с постоянно работающим насосом подкачки (P_1). Для измерения уровня в емкости установлен датчик уровня (X). На линии подкачки после насоса установлен многопозиционный регулирующий клапан (ИМ) с электроприводом (М) (имеет позиционер и два управляющих дискретных входа: открывать и закрывать).

Управление клапаном осуществляется по уставке (SP):

- при $X < SP-D$: на привод клапана подается сигнал «Больше» (открывать)
- при $X = SP$: на привод клапана не подается ни один сигнал (держат позицию)
- при $X > SP+D$: на привод клапана подается сигнал «Меньше» (закрывать)

Значения гистерезиса должны быть подобраны таким образом, чтобы не допустить сильного опустошения емкости (гистерезис $-D$) и перелива (гистерезис $+D$).



Зона гистерезиса

Для предотвращения «дребезга» (частого включения/выключения) управляющего исполнительного элемента (например, реле) и исполнительного механизма (например, нагревательного элемента, насоса и т.п.) вблизи уставки (SP), предусматривается гистерезис — зона нечувствительности (D).

Гистерезис (в некоторых типах регуляторов) может принимать как положительные, так и отрицательные значения. Отрицательные значения гистерезиса используются в основном для упреждения или задержки включения (выключения) выходных устройств.

Гистерезис применяют для того, чтобы учесть инерционность объекта управления.

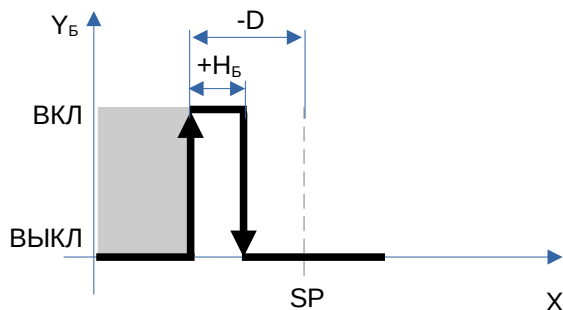
Также зона гистерезиса предназначена для исключения одновременного включения выходных устройств $Y_б$ (больше) и $Y_м$ (меньше) (например, при управлении реверсивным двигателем одновременное включение двух направлений может привести к выходу двигателя из строя). В таких случаях к зоне нечувствительности (D) добавляют дополнительную зону гистерезиса (H — значение должно быть не меньше минимально допустимого времени работы исполнительного механизма).

КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

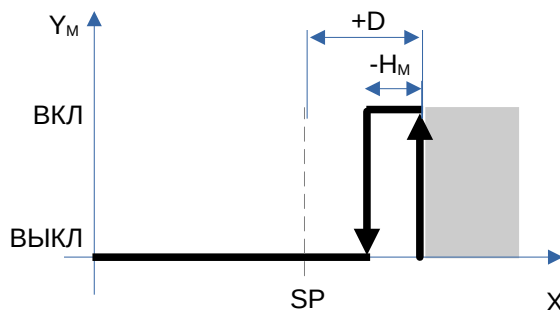
ТРЕХПОЗИЦИОННЫЙ РЕГУЛЯТОР

Базовый алгоритм регулирования

Базовый алгоритм двухпозиционного регулятора определяется статической характеристикой (зависимостью Y_B и Y_M от X):



при $X < SP-D$: $Y_B = MAX$
при $X > SP-D+H_B$: $Y_B = 0$



при $X > SP+D$: $Y_M = MAX$
при $X < SP+D-H_M$: $Y_M = 0$

Настройки регулятора

Наименование	Обозначение	Предел допустимых значений
Уставка	SP	...
Зона нечувствительности	D	% SP
Дополнительная зона гистерезиса для Y_B	H_B	% D
Дополнительная зона гистерезиса для Y_M	H_M	% D

Переходной процесс регулятора

Процесс трехпозиционного регулятора — автоколебательный.

Регулируемый параметр (X) как в переходном, так и в установившемся режиме изменяется относительно уставки (SP) в виде незатухающих колебаний. При достаточной точности настройки регулятора можно получить часть колебаний в зоне нечувствительности (D), где исполнительный механизм находится в режиме ожидания (не работает), тем самым уменьшив его время работы.

Основные показатели процесса:

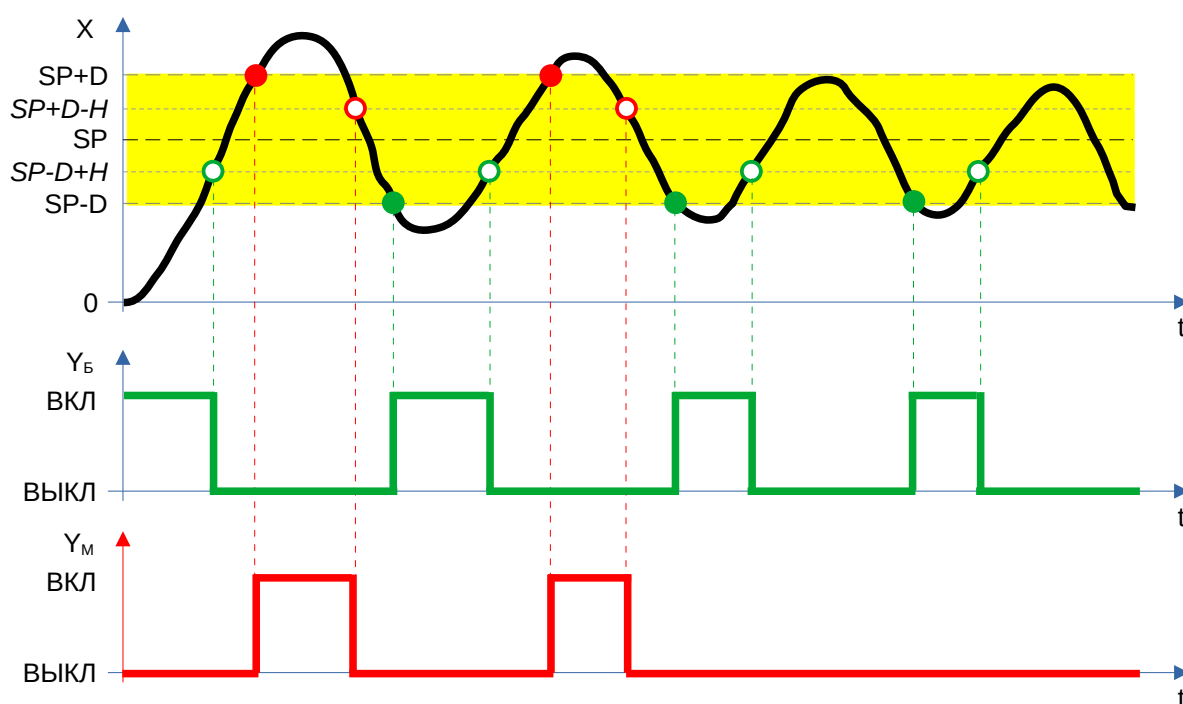
- Амплитуда колебаний (A_K)
 - чем меньше, тем лучше (меньше отклонение от уставки)
- Период колебаний (T_K)
 - чем больше, тем лучше (реже вкл/выкл ИМ)

Основные показатели процесса зависят от следующих характеристик объекта управления:

- временное запаздывания (τ)
(в том числе запаздывания переключающего элемента — например, реле)
- постоянная времени (T)
- максимальная скорость изменения X (R)

КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

ТРЕХПОЗИЦИОННЫЙ РЕГУЛЯТОР



$A_k \uparrow$ (увеличивается), если:

- $D \uparrow$
- $(\tau / T) \uparrow$
- $R \uparrow$

$T_k \uparrow$ (увеличивается), если:

- $\tau \uparrow$
- $T \uparrow$

Точность регулирования X зависит от величины гистерезиса (D): чем меньше D , тем точнее регулирование, но тем чаще вкл/выкл управляющий элемент (больше его износ).

Уменьшая гистерезис можно повысить качество регулирования, но до некоторого предела, определяемого параметрами объекта управления.

Импульсное управление

Двухпозиционный импульсный регулятор применяется для управления исполнительными механизмами путем подачи дискретных сигналов небольшой длительности (импульс).

Данный тип управления может быть использован в схемах, где исполнительным элементом является реле (контактор, пускатель) с самоблокировкой, т. е. с установкой на «самоподхват» (по аналогии со схемами для Двухпозиционных регуляторов).

Также данный тип управления может быть использован в схемах, где исполнительный механизм способен работать как с постоянными сигналами, так и с импульсными (например, шаговому двигателю клапана запорно-регулирующего достаточно короткого импульса, чтобы незначительно сдвинуть задвижку).

Базовый алгоритм регулятора здесь остается таким же как и для неимпульсного режима.

КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

ТРЕХПОЗИЦИОННЫЙ РЕГУЛЯТОР

Настройки регулятора в импульсном режиме

Наименование	Обозначение	Предел допустимых значений
Уставка	SP	...
Зона нечувствительности	D	% SP
Дополнительная зона гистерезиса для Y_B	H_B	% D
Дополнительная зона гистерезиса для Y_M	H_M	% D
Длительность управляющего импульса для Y_B	$t_{БИ}$	зависит от исполнительного элемента
Длительность управляющего импульса для Y_M	$t_{МИ}$	зависит от исполнительного элемента

При изменении длительности управляющего импульса изменяется скорость работы исполнительного механизма, что в свою очередь вызывает более точный выход на заданную точку, однако данный тип регулятора является более инерционным по сравнению с обычным трехпозиционным регулятором.

Величина длительностей управляющего импульса устанавливается таким образом, чтобы был найден оптимальный компромисс между минимально допустимой длительностью включения исполнительного механизма и получаемого в результате этого характера регулируемой величины.

КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

МНОГОПОЗИЦИОННЫЙ РЕГУЛЯТОР

Многопозиционный регулятор обеспечивает хорошее качество регулирования для инерционных объектов с малым запаздыванием

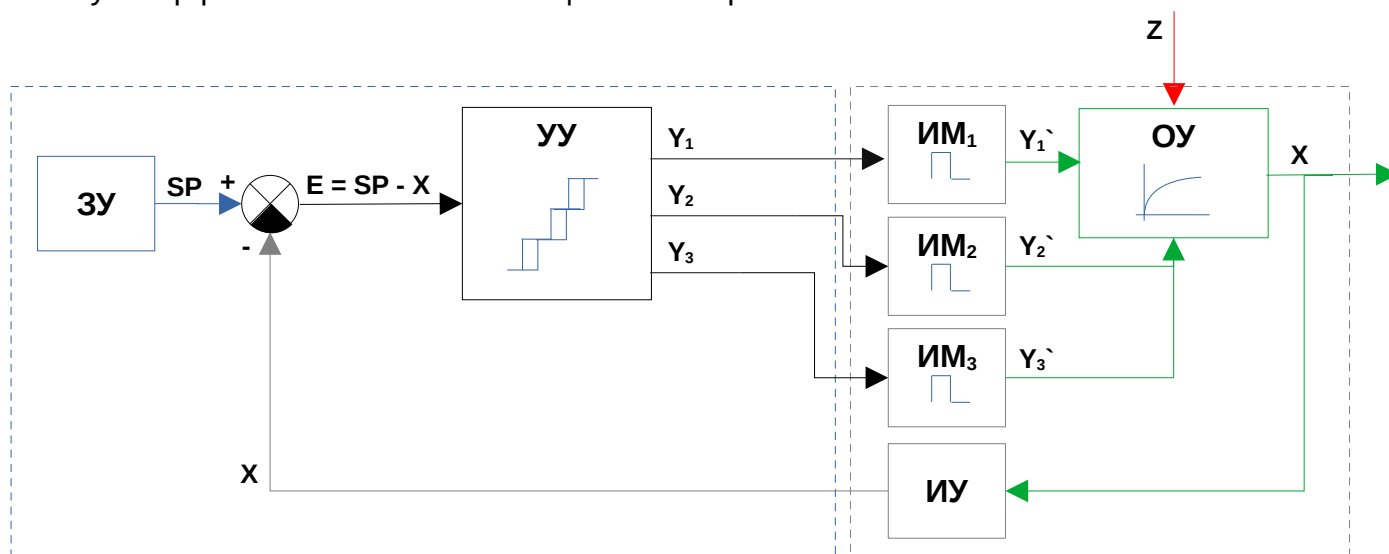
Управление регулируемым параметром (X) выполняется несколькими нагрузками, например:

- группа нагревателей разной мощности (например, один мощный для быстрого нагрева, другой маломощный для медленного нагрева и поддержания температуры)
- вентиляторы
- заслонки

Управляет переключательными (дискретными) исполнительными элементами:

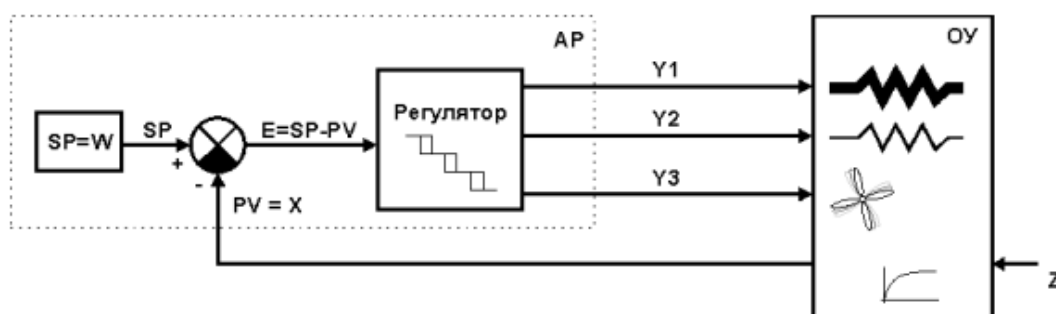
- электромеханическими реле
- контакторами
- транзисторными ключами
- симисторными или тиристорными устройствами
- твердотельными реле

Регулятор работает как многопозиционный переключатель.



Пример

Температура в камере регулируется двумя нагревательными элементами (ТЭН): один большой мощности для быстрого выхода на уставку, другой — менее мощный для поддержания температуры. Для понижения температуры (охлаждения) используется вентилятор.



КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

МНОГОПОЗИЦИОННЫЙ РЕГУЛЯТОР

Зона гистерезиса

Для предотвращения «дребезга» (частого включения/выключения) управляющего исполнительного элемента (например, реле) и исполнительного механизма (например, нагревательного элемента, насоса и т.п.) вблизи уставки (SP), предусматривается гистерезис — зона нечувствительности (D).

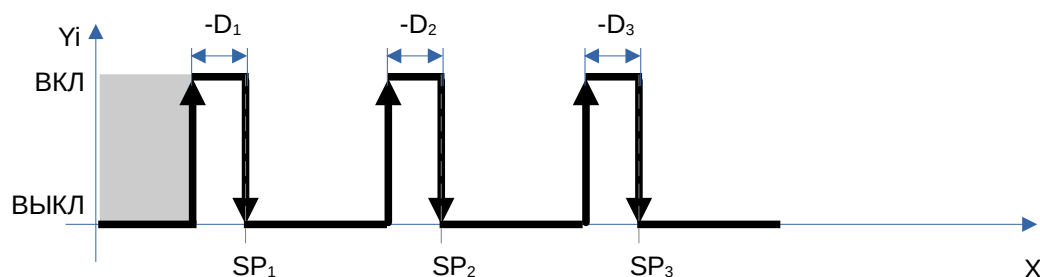
Гистерезис (в некоторых типах регуляторов) может принимать как положительные, так и отрицательные значения. Отрицательные значения гистерезиса используются в основном для упреждения или задержки включения (выключения) выходных устройств.

Гистерезис применяют для того, чтобы учесть инерционность объекта управления.

Более подробно описание представление зоны гистерезиса дано в разделе «Двухпозиционный регулятор» (принцип тот же).

Базовый алгоритм регулирования

Базовый алгоритм двухпозиционного регулятора определяется статической характеристикой (зависимостью Y_i от X):



Лоика работы многопозиционного регулятора может быть представлена:

- графически в виде статической характеристики (см. выше)
- в виде таблицы состояний (см. пример ниже)

Область значения X	Y_1	Y_2	Y_3
$X > SP_1$	ВЫКЛ	ВКЛ	ВКЛ
$X < SP_1 - D_1$	ВКЛ	ВКЛ	ВКЛ
$X > SP_2$	ВЫКЛ	ВЫКЛ	ВКЛ
$X < SP_2 - D_2$	ВЫКЛ	ВКЛ	ВКЛ
$X > SP_3$	ВЫКЛ	ВЫКЛ	ВЫКЛ
$X < SP_3 - D_3$	ВЫКЛ	ВЫКЛ	ВКЛ

В качестве логики работы выходных устройств может быть использована различная логика работы двухпозиционных и/или трехпозиционных законов регулирования, а также различные направления регулирования (в таблице с примером выше указана обратная логика управления).

Наибольший эффект использования таблицы состояний достигается при проектировании и программировании очень сложных алгоритмов регулирования.

КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

МНОГОПОЗИЦИОННЫЙ РЕГУЛЯТОР

Настройки многопозиционного регулятора

Наименование	Обозначение	Предел допустимых значений
Уставка для Y_1	SP_1	...
Зона нечувствительности для Y_1	D_1	% SP_1
Уставка для Y_2	SP_2	...
Зона нечувствительности для Y_2	D_2	% SP_2
Уставка для Y_3	SP_3	...
Зона нечувствительности для Y_3	D_3	% SP_3

Используя возможность программирования различных параметров позволяет создать большое количество разнообразных многопозиционных систем регулирования.

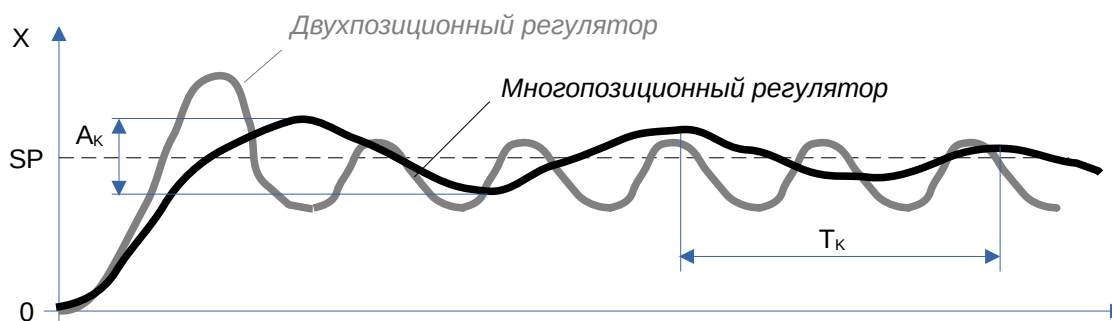
Переходной процесс регулятора

Процесс многопозиционного регулирования, как и всех позиционных (релейных) законов регулирования, является автоколебательным.

Регулируемый параметр (X) как в переходном, так и в установившемся режиме изменяется относительно уставки (SP) в виде незатухающих колебаний.

Основные показатели процесса:

- Амплитуда колебаний (A_K)
 - чем меньше, тем лучше (меньше отклонение от уставки)
- Период колебаний (T_K)
 - чем больше, тем лучше (реже вкл/выкл ИМ)



По сравнению с двухпозиционными регуляторами, многопозиционные регуляторы имеют большую точность регулирования, большую реакцию системы регулирования, меньшее время регулирования, а также улучшенные показатели качества регулирования.

КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

ТИПОВЫЕ ЗВЕНЬЯ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Звено системы регулирования – это элемент, обладающий определенными свойствами в динамическом отношении.

Звенья систем регулирования могут иметь разную физическую основу (электрические, пневматические, механические и др. звенья), но относятся к одной группе. Соотношение входных и выходных сигналов в звеньях одной группы описываются одинаковыми передаточными функциями.

Простейшие типовые звенья:

- усилительное
- интегрирующее идеальное, интегрирующее реальное
- дифференцирующее (идеальное, реальное)
- апериодическое инерционное
- колебательное
- запаздывающее



Усилительное звено, пропорциональное звено усиливает входной сигнал в K раз.

Пример усилительного звена: механические передачи, датчики. Усилительное звено является безинерционным звеном.

Идеальное интегрирующее звено имеет выходную величину пропорциональную интегралу входной величины. При подаче сигнала на вход звена выходной сигнал постоянно возрастает. Идеальное интегрирующее звено является астатическим, т.к. не имеет установившегося режима.

Реальное интегрирующее звено является звеном с запаздыванием. Переходная характеристика в отличие от идеального звена является кривой.

Примеры интегрирующего звена: емкость, наполняемая водой.

Идеальное дифференцирующее звено физически не реализуемо.

Реальное дифференцирующее звено характерно для большинства тепловых объектов. Например, при подаче на вход электрической печи напряжения ее температура будет изменяться по аналогичному закону.

Колебательное звено при подаче на вход ступенчатого воздействия амплитудой X_0 будет выдавать переходную характеристику: амплитудную (при $T_1 \geq 2T_2$) или колебательную (при $T_1 < 2T_2$).

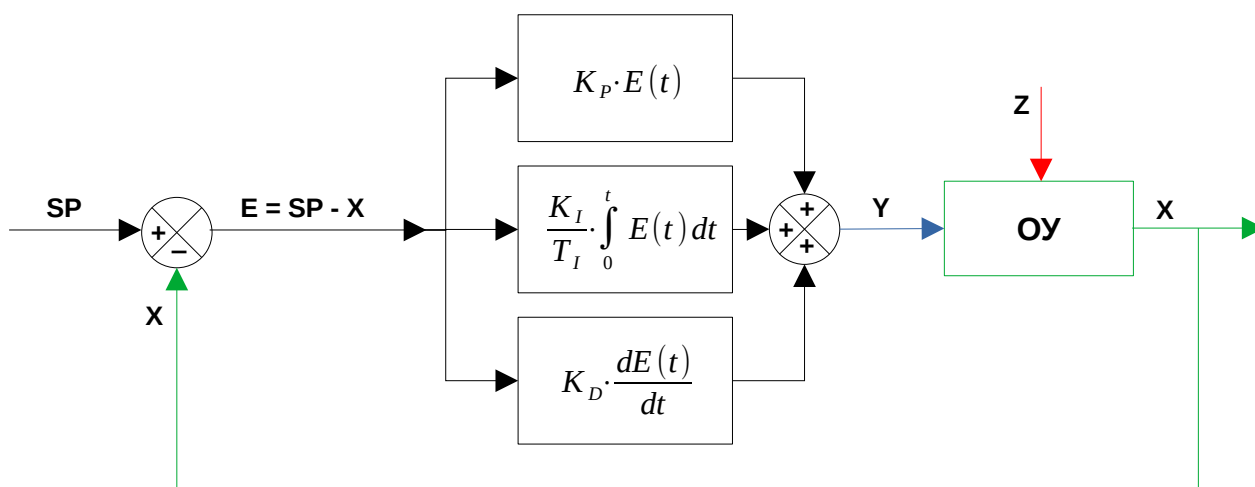
КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

ПИД РЕГУЛЯТОР

ПИД-регулятор — устройство в управляющем контуре с (обязательной) обратной связью. Данный регулятор используется в системах автоматического регулирования для формирования управляющего сигнала с целью получения необходимой точности и качества переходного процесса.

ПИД-регулятор формирует управляющий сигнал, являющийся суммой трех слагаемых:

- Пропорциональная составляющая (P)
- Интегральная составляющая (I)
- Дифференциальная составляющая (D)



$$Y(t) = \underbrace{(K_P \cdot E(t))}_P + \underbrace{\left(K_I \cdot \int_0^t E(t) dt\right)}_I + \underbrace{K_D \cdot \frac{dE(t)}{dt}}_D$$

Каждая составляющая регулятора — это произведение коэффициента усиления (K_P , K_I , K_D) на какой-то значащий компонент. Обнуляя коэффициент, обнуляется вся его компонента. Таким образом, можно получить частные случаи ПИД-регулятора: П-, PI-, ПД-регулятор и прочие сочетания.

Работа ПИД-регулятора циклична, т. е. функцию регулятора необходимо вызывать через определенный промежуток времени — **Период квантования регулятора / Время дискретизации регулятора** ($t_{\text{рег}}$) / **Время тактирования регулятора**.

ПИД-регулятор настолько универсален, что применяется практически везде, где нужно автоматическое управление.

Реализовать (запрограммировать) самостоятельно закон ПИД-регулятора не сложно.

Настраивать ПИД-регулятор тоже не так уж и сложно.

КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

ПИД РЕГУЛЯТОР

Пропорциональная составляющая

Пропорциональная составляющая (P) представляет собой произведение текущего значения рассогласования (E) и коэффициента усиления / передачи (пропорциональности) (K_P).

$$P(t) = K_P \cdot E(t) \quad (0,1 \leq K_P \leq 40)$$

K_P — число, усиливающее реакцию системы на возникшее рассогласование; формулы для этого коэффициента не определены.

Главные задачи П-составляющей в ПИД-регуляторе:

- Повысить быстродействие системы
- Устранить рассогласования (E) в текущий момент времени

П-составляющая является, по сути, основной в ПИД-регуляторе

П-составляющая не имеет памяти, т. е. значение управляющего сигнала (Y) не зависит от предыдущего состояния системы.

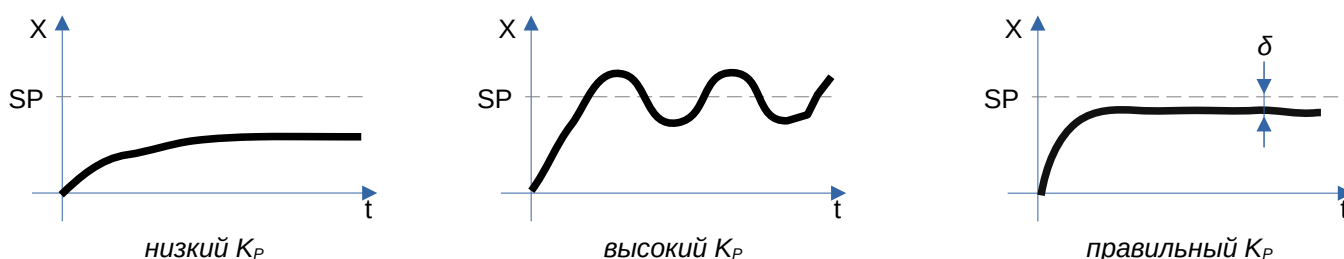
П-составляющая вырабатывает управляющий сигнал (Y), противодействующий рассогласованию (E) — компенсирует отклонение контролируемого параметра (X), наблюдаемого в данный момент времени.

Из формулы видно, что управляющий сигнал в K_P -раз больше рассогласования. Если рассогласование будет равно нулю ($E = 0$), то управляющий сигнал тоже будет нулевым ($Y = 0$) — характеристика со временем начнет «падать» и регулятору придется опять компенсировать появившееся рассогласование. Таким образом, П-составляющая не способна полностью компенсировать (удержать в нуле) рассогласование.

Поэтому, в П-регуляторах всегда присутствует остаточная статическая ошибка (δ) и незначительный колебательный процесс.

Чем больше K_P , тем больше скорость регулирования (быстрее устраняется рассогласование). Скорость влияния регулятора на рассогласование ограничена лишь только временем дискретизации системы и временными запаздываниями.

При слишком большом K_P в системе могут начаться автоколебания, а при дальнейшем увеличении значения этого коэффициента система и вовсе может потерять свою устойчивость.



КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

ПИД РЕГУЛЯТОР

Достоинства и недостатки:

- + простота реализации
- + высокая скорость регулирования
- наличие остаточной статической ошибки (δ)
- невысокая устойчивость при сильно большом значении коэффициента
- неустойчив при работе на больших скоростях (при быстрых изменениях X)
- неустойчив при резких (быстрых) возмущающих воздействиях (Z)

Регуляторы, работающие только по П-закону, применяют редко - если технологическим режимом допускается постоянная (остаточная) статическая ошибка и незначительный колебательный процесс.

П-закон совмещают с:

- И-законом для полного устранения остаточной статической ошибки
- Д-законом для работы на больших скоростях и/или сглаживании резких возмущающих воздействий

КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

ПИД РЕГУЛЯТОР

Интегральная составляющая

Интегральная составляющая (I) представляет собой произведение интеграла по времени от рассогласования (E) и коэффициента усиления / передачи (интеграла). (K_I) — по сути, это интеграл от ошибки

$$I(t) = K_I \cdot \int_0^t E(t) dt \quad (0.001 \leq K_I \leq 1)$$

K_I обратно пропорционален постоянной времени интегрирования (T_I):

$$K_I = \frac{1}{T_I} \quad T_I = \frac{1}{K_I} \quad (1 \text{ с} \leq T_I \leq 6000 \text{ с})$$

$$I(t) = \frac{1}{T_I} \cdot \int_0^t E(t) dt$$

Постоянная времени интегрирования (T_I) — это интервал времени от момента поступления уставки (SP) на вход регулятора до момента достижения контролируемым параметром (X) этой уставки (когда $X == SP$). Допускается принимать за постоянную времени интегрирования — постоянную времени объекта ($T_I = T$).

Чем больше время интегрирования, тем меньше влияние регулирующего воздействия (Y) на контролируемый параметр (X) — процесс выхода на уставку будет затянут по времени.

Главные задачи И-составляющей в ПИД-регуляторе:

- Компенсация остаточной статической ошибки
- Обеспечение высокой точности регулирования

И-составляющая (integra - составной) — это сумма И-составляющей на предыдущем цикле работы регулятора ($I(t-1)$) и произведения текущего значения рассогласования ($E(t)$) и коэффициента усиления (K_I). Т.е., И-составляющая обладает памятью. С учетом времени дискретизации регулятора ($t_{\text{рег}}$) формулу И-составляющей можно записать следующим образом:

$$I(t) = I(t-1) + (E(t) * K_I)$$

- аргумент dt опущен, т.к. учтено время дискретизации регулятора (регулятор выполняется циклически с определенным периодом).

Интеграл, буквально, копит (аккумулирует) ошибку (рассогласование):

- Накопление ошибки в сторону увеличения
 - когда $X < SP$ ($E > 0$)
регулирование до уставки
«наматывается клубок ошибок»
- Накопление ошибки в сторону уменьшения
 - когда $X > SP$ ($E < 0$)
регулирование выше уставки
«разматывается клубок ошибок»

КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

ПИД РЕГУЛЯТОР

Накопленное значение интеграла, усиленное коэффициентом, со временем увеличивает свое воздействие на объект, что в итоге позволяет почти полностью компенсировать (уничтожить) остаточное рассогласование, которое было не по силам П-регулятору.

Т.е., **в установившемся процессе управляющий сигнал регулятора (Y) обеспечивается только интегральной составляющей.**

Сам по себе И-регулятор обладает низким быстродействием (чем больше T_i , тем дольше процесс регулирования). При неправильно подобранном коэффициенте усиления (K_i) И-составляющая может породить осцилляции в зоне уставки — неустойчивость системы (при слишком малом значении коэффициента).

Достоинства и недостатки:

- + способность полностью компенсировать рассогласование (при любом K_i)
- низкое быстродействие
- посредственная устойчивость

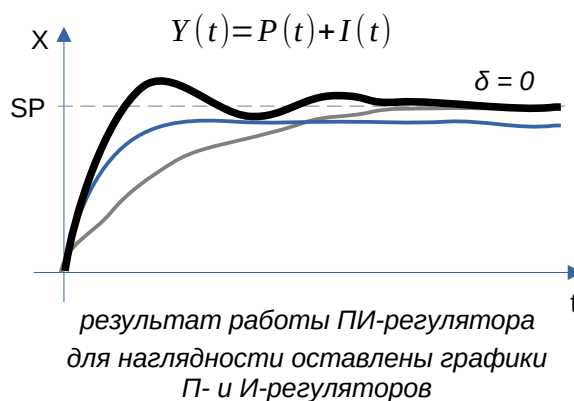
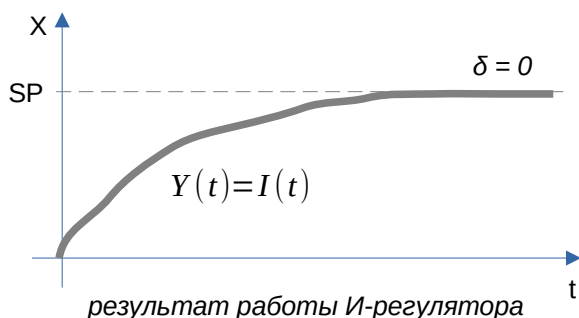
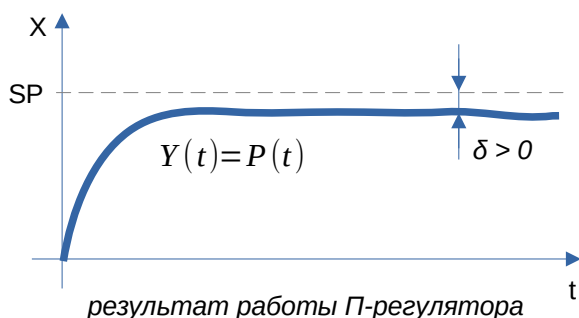
Регуляторы, работающие только по И-закону, применяют довольно часто.

И-закон чаще всего совмещают с:

- П-законом для увеличения быстродействия регулирования

Только И-регулятор достаточен для вялотекущих процессов, где допустим долгий (затяжной) выход на уставку.

В большинстве случаев достаточно ПИ-регулятора, особенно в условиях шумной обратной связи (Д-составляющая здесь может только усугубить ситуацию).



КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

ПИД РЕГУЛЯТОР

Дифференциальная составляющая

Дифференциальная составляющая (D) представляет собой произведение значения скорости изменения рассогласования (dE/dt) и коэффициента усиления / передачи (дифференциала) (K_D) — по сути, это производная от ошибки по времени.

$$D(t) = K_D \cdot \frac{dE(t)}{dt} \quad (0.01 \leq K_D \leq 10)$$

K_D пропорционален постоянной времени дифференцирования (T_D):

$$K_D = T_D$$

$$D(t) = T_D \cdot \frac{dE(t)}{dt}$$

Постоянная времени дифференцирования (T_D) — это время от момента установившегося процесса до момента возникшего перерегулирования.

Коэффициент передачи (или время дифференциала) позволяет настроить вес (или резкость) компенсации резких изменений в системе — предотвратить сильное пререгулирование, уменьшить раскачку, компенсировать запаздывания воздействия регулятора.

Главные задачи D-составляющей в ПИД-регуляторе:

- Повышение устойчивости регулирования

D-составляющая (integra - составной) — это разность текущего значения рассогласования ($E(t)$) и рассогласования на предыдущем цикле работы регулятора ($E(t-1)$), помноженную на коэффициент усиления (K_D). Дифференциальная составляющая предсказывает отклонение регулируемого параметра (X) в будущем и противодействует этому отклонению. С учетом времени дискретизации регулятора ($t_{\text{РЕГ}}$) формулу D-составляющей можно записать следующим образом:

$$D(t) = (E(t) - E(t-1)) \cdot K_D$$

- аргумент dt опущен, т.к. учтено время дискретизации регулятора (регулятор выполняется циклически с определенным периодом).

Дифференциал является своеобразным показателем скорости, направления изменения рассогласования (перерегулирования) и насколько рассогласование изменилось за одну временную единицу дискретности регулятора:

- Перерегулирование вверх
 - когда $[E(t) - E(t-1)] > 0$
- Перерегулирование вниз
 - когда $[E(t) - E(t-1)] < 0$

D-составляющая работает только при наличии разницы между рассогласованиями текущего и предыдущего циклов работы регулятора. Если разницы нет ($dE/dt = 0$), то D-составляющая равна нулю и перестает оказывать воздействие на управляющий сигнал (Y).

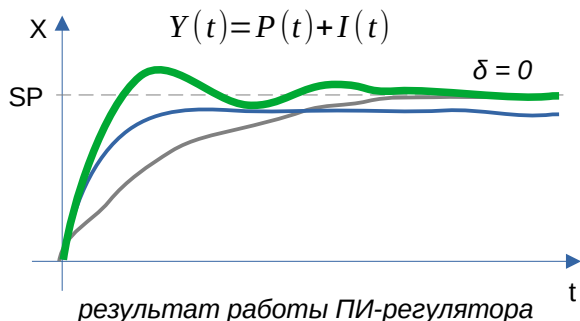
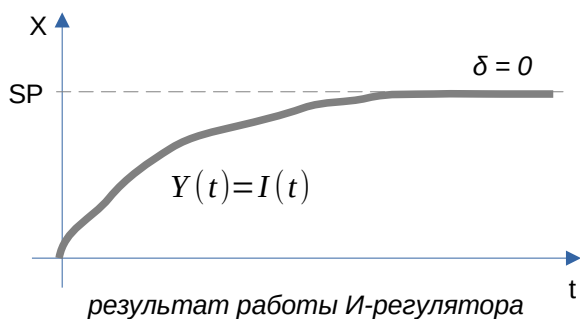
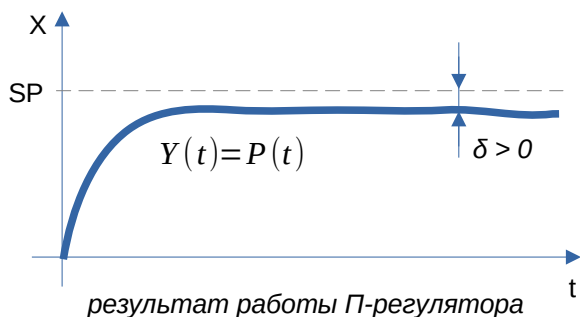
КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

ПИД РЕГУЛЯТОР

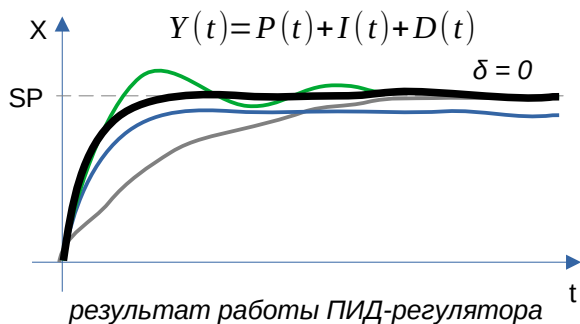
Регуляторов, состоящих только из Д-составляющей, не бывает.

Д-закон чаще всего совмещают с:

- П- и/или И-законом для повышения устойчивости регулирования



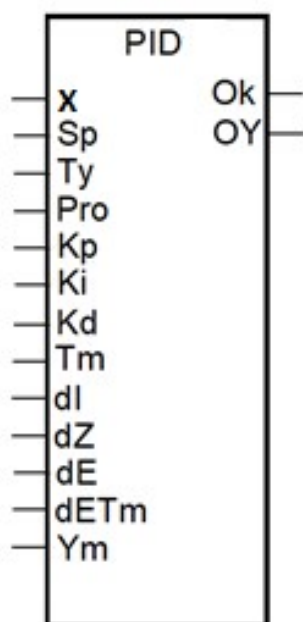
для наглядности оставлены графики П- и И-регуляторов



КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

ПИД РЕГУЛЯТОР

Базовый алгоритм регулятора со встроенным таймером задержки



Входы:

X – контролируемый параметр [REAL]
= 0.0 (по умолчанию)

Sp – уставка (в единицах значения X) [REAL]
= 0.0 (по умолчанию)

Ty – тип регулятора [BYTE]
= 0 – ПИД (по умолчанию)
= 1 – ПИ
= 2 – ПД
= 3 – П

Pro – процесс изменения управляющего сигнала (Y) [BYTE]
= 0 – увеличение (например, нагрев) (по умолчанию)
= 1 – уменьшение (например, охлаждение)

Kp – коэффициент пропорции [REAL]
= 0.0 (по умолчанию)

Ki – коэффициент интеграла [REAL]
= 0.0 (по умолчанию)

Kd – коэффициент дифференциала [REAL]
= 0.0 (по умолчанию)

Tm – время задержки выполнения алгоритма регулятора (мсек) [BYTE]
= 1000 (по умолчанию)

dI – зона интегральной составляющей (в единицах значения X) [REAL]
= 0.0 (по умолчанию)

dZ – зона нечувствительности (в единицах значения X) [REAL]
= 0.0 (по умолчанию)

dE – допуск контролируемого параметра ($\pm X$) для диагностики контура управления [REAL]
= 0.0 (по умолчанию)

dETm – время диагностики контура управления (мс) [DWORD]
= 5000 (по умолчанию)

Ym – тип выхода регулятора [BYTE]
= 0 – униполярный (от 0.0 до 100.0 %) (по умолчанию)
= 1 – биполярный (от -100.0 до 100.0 %).

Выходы:

Ok – статус работы регулятора [BYTE]
= 0 – останов

= 1 – работа

= 2 – работа в dZ

= 3 – работает в dI

= 4 – обрыв контура управления

= 5 – заклинивание контура управления

OY – управляющий сигнал (%) [REAL]
= 0.0 (по умолчанию)

КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

ПИД РЕГУЛЯТОР

Функциональный блок «PID» реализует закон ПИД-регулятора и выдает управляющее воздействие ($Y\%$) в зависимости от значения рассогласования ($E = Sp - X$).

Состояние работы функционального блока контролируется по выходу (Ok).

Тип регулятора

Выбор типа регулятора (П, ПД, ПИ, ПИД) выполняется через вход (Ty).

Тип регулятора можно определить также, отключив соответствующую составляющую (П, И и/или Д), обнулив ее входной коэффициент (K_P, K_I, K_D).

Таймер задержки

Тактирование (квантование) регулятора выполняется от внутреннего таймера функционального блока по заданной уставке времени (Tm , мсек) — время задержки.

Зона интегрирования

Зона работы И-составляющей регулятора задается через вход (dl) как допуск (\pm) к уставке (Sp). Зона задается в единицах измерения контролирующего параметра (X) и должна быть шире зоны нечувствительности (dZ), чтобы интеграл успел накопить данные.

Если зона определена ($dl > 0$), то только в пределах нее будет работать (накапливать ошибку) интеграл. Вне зоны накопленный интеграл принудительно обнуляется. Факт работы в зоне фиксируется в выходном статусе ($Ok = 2$).

Если зона равна нулю ($dl = 0$), то интегрирование будет выполняться во всем диапазоне.

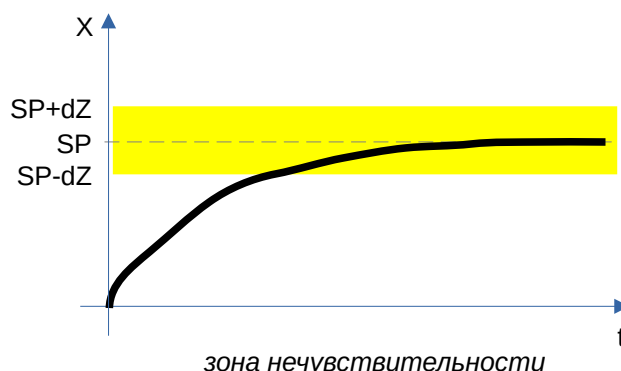
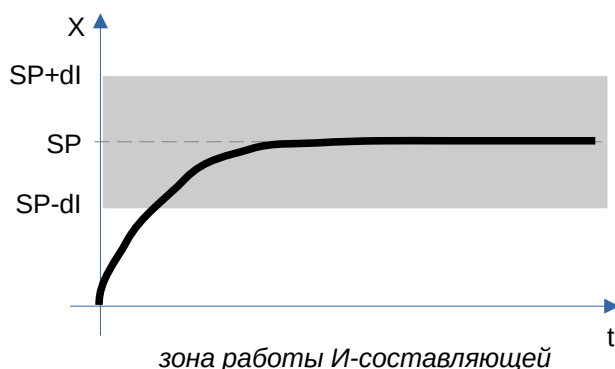
Нулевой коэффициент (K_I) также сбрасывает накопленный интеграл.

Зона нечувствительности

Зона нечувствительности регулятора задается через вход (dZ) как допуск (\pm) к уставке (Sp). Зона задается в единицах измерения контролирующего параметра (X).

Если зона определена ($dZ > 0$), то в пределах нее регулятор не работает (не интегрирует, не модифицирует управляющий сигнал OY) — управляющий сигнал остается равным тому значению, которое было на момент входа в эту зону. Факт работы в зоне фиксируется в выходном статусе ($Ok = 3$). Рассогласование (E) всегда нулевое.

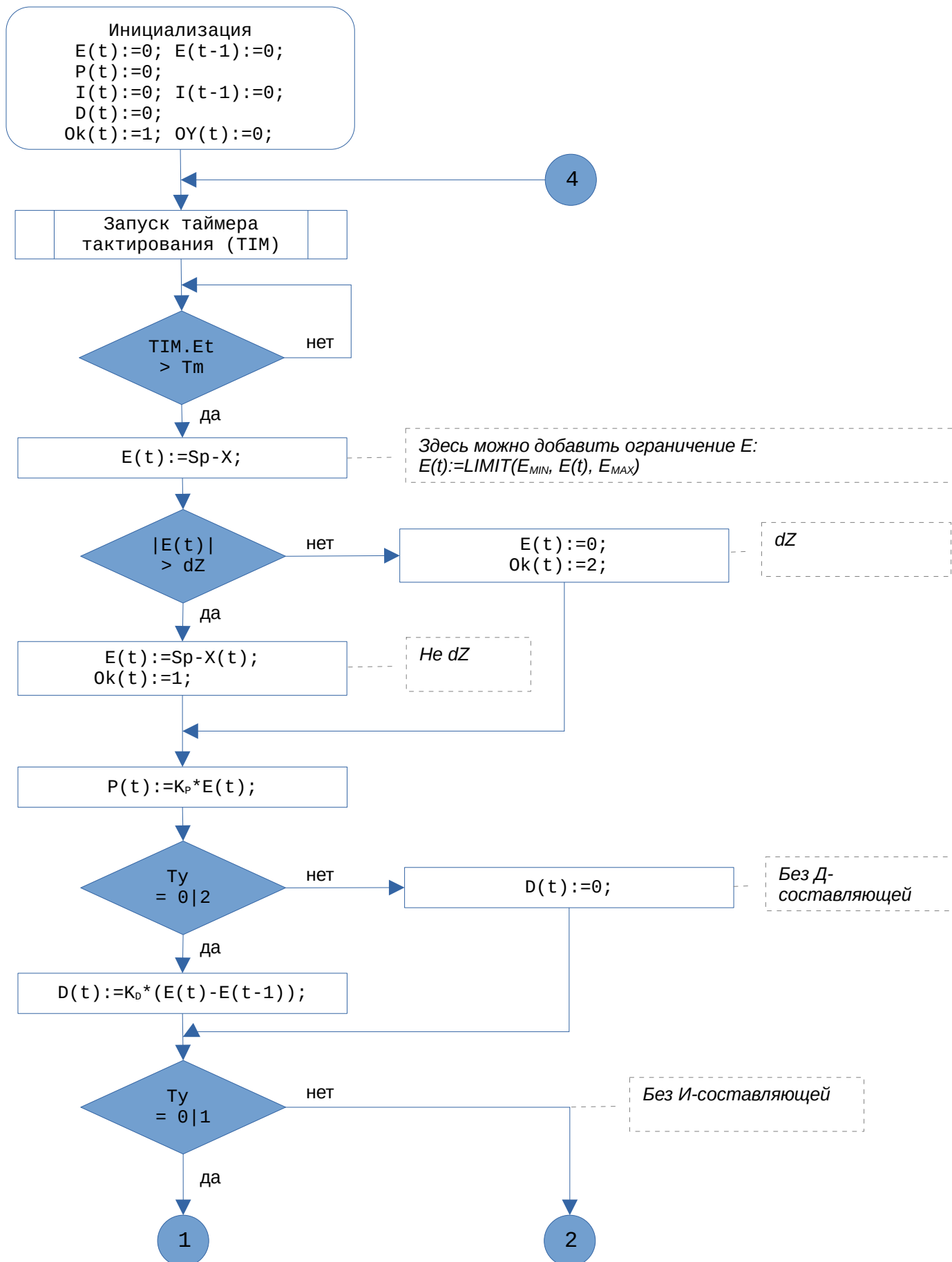
Если зона равна нулю ($dZ=0$), то работа регулятора будет выполняться во всем диапазоне.



КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

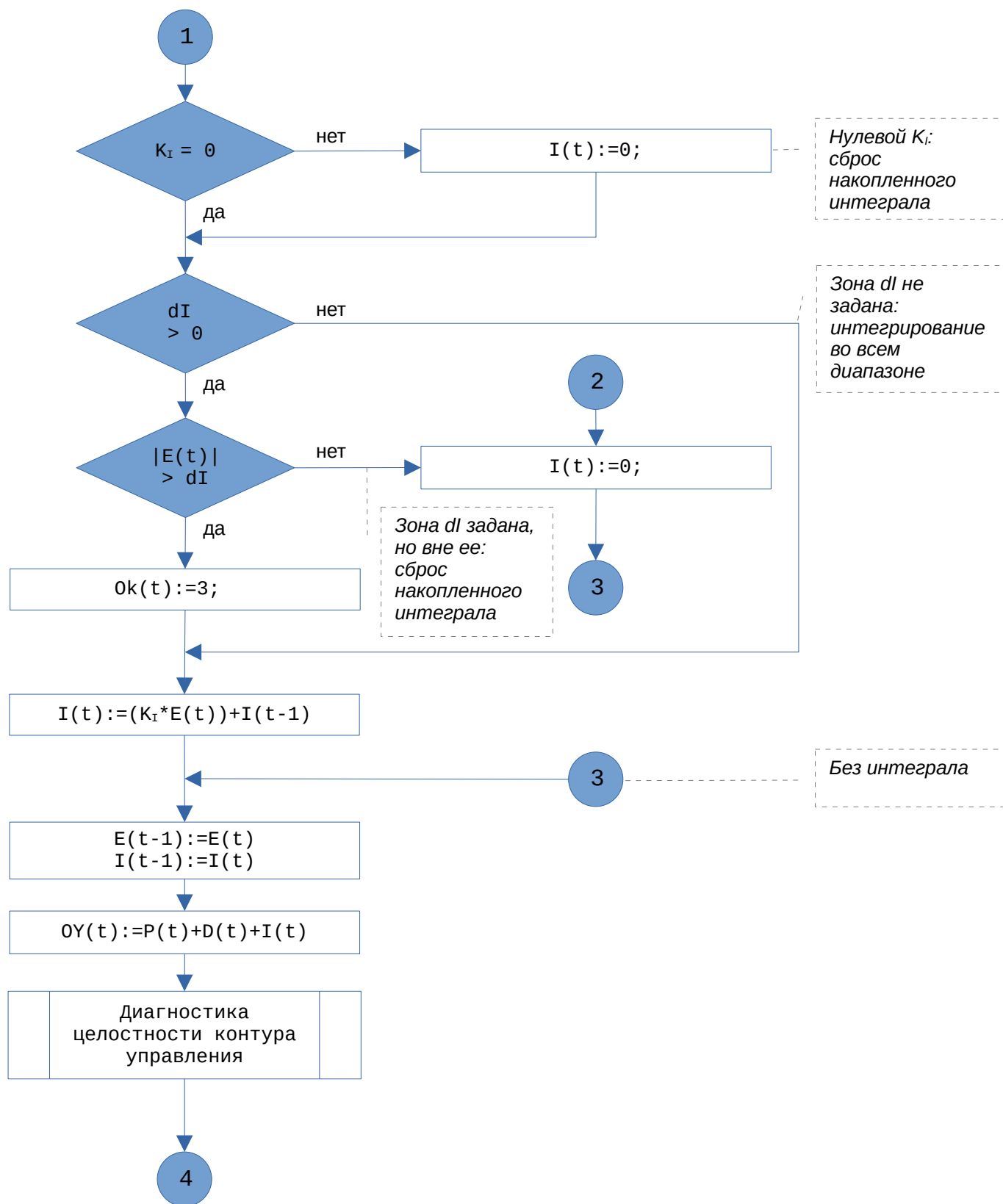
ПИД РЕГУЛЯТОР

Блок схема алгоритма



КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

ПИД РЕГУЛЯТОР



КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

ПИД РЕГУЛЯТОР

Диагностика целостности контура управления

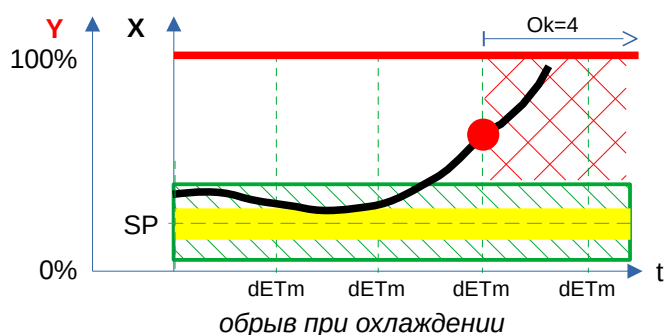
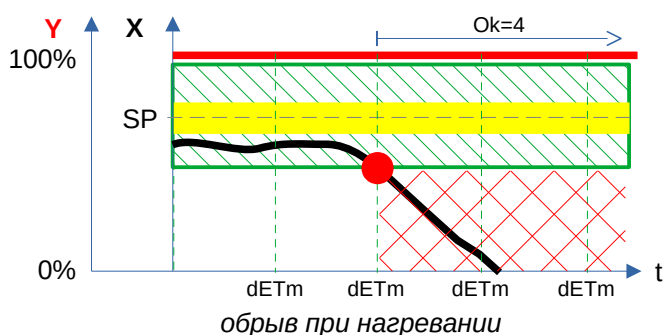
Функциональный блок ПИД-регулятора позволяет диагностировать:

- обрыв контура управления
- заклинивание контура управления

Диагностика выполняется вне зоны нечувствительности. Если обрыв или заклинивание обнаружены, то они только фиксируются в выходном статусе (Ok) — регулятор не останавливается (требуется контролировать статус и принимать решение вне этого блока).

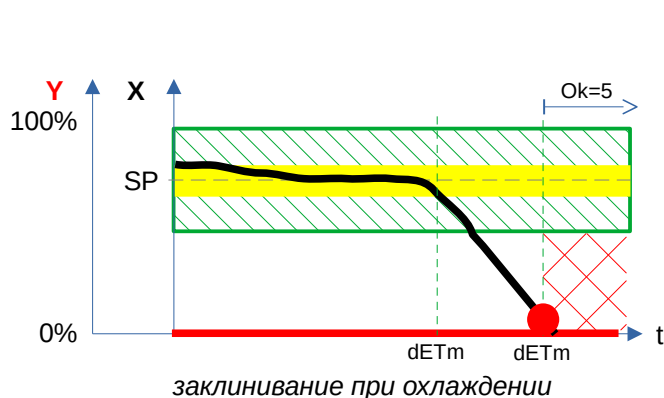
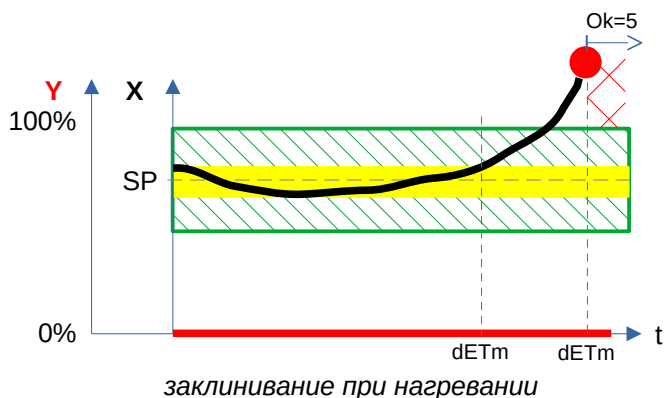
Обрыв контура управления означает, что значение управляющего сигнала (OY) достигло максимума (100%) и не оказывает воздействия на объект управления — не приводит к предполагаемому изменению контролируемого параметра (X). Например, обрыв (перегорание) нагревательных спиралей в печи. Подача мощности на перегоревшие спирали не приведет к ожидаемому нагреву.

Обрыв контура управления фиксируется в выходном статусе (Ok = 4), когда при максимальном управляющем сигнале (OY = 100%) абсолютное значение рассогласования (E) остается больше зоны допуска (dE) в течение времени (dETm).



Заклинивание контура управления означает, что даже при отсутствии управляющего сигнала (OY) на объект управления все равно оказывается воздействие — происходит изменение контролируемого параметра (X) с неожиданно большой скоростью. Например, заварка контактов пускателя, подающего питание на нагревательные элементы печи. Даже при снятом напряжении с обмотки пускателя через заваренный контакт продолжает подаваться напряжение на нагревательные элементы и печь продолжает нагреваться.

Заклинивание контура управления фиксируется в выходном статусе (Ok = 5), когда при отсутствующем управляющем сигнале (OY = 0%) абсолютное значение рассогласования (E) остается больше зоны допуска (dE) в течение времени (dETm).



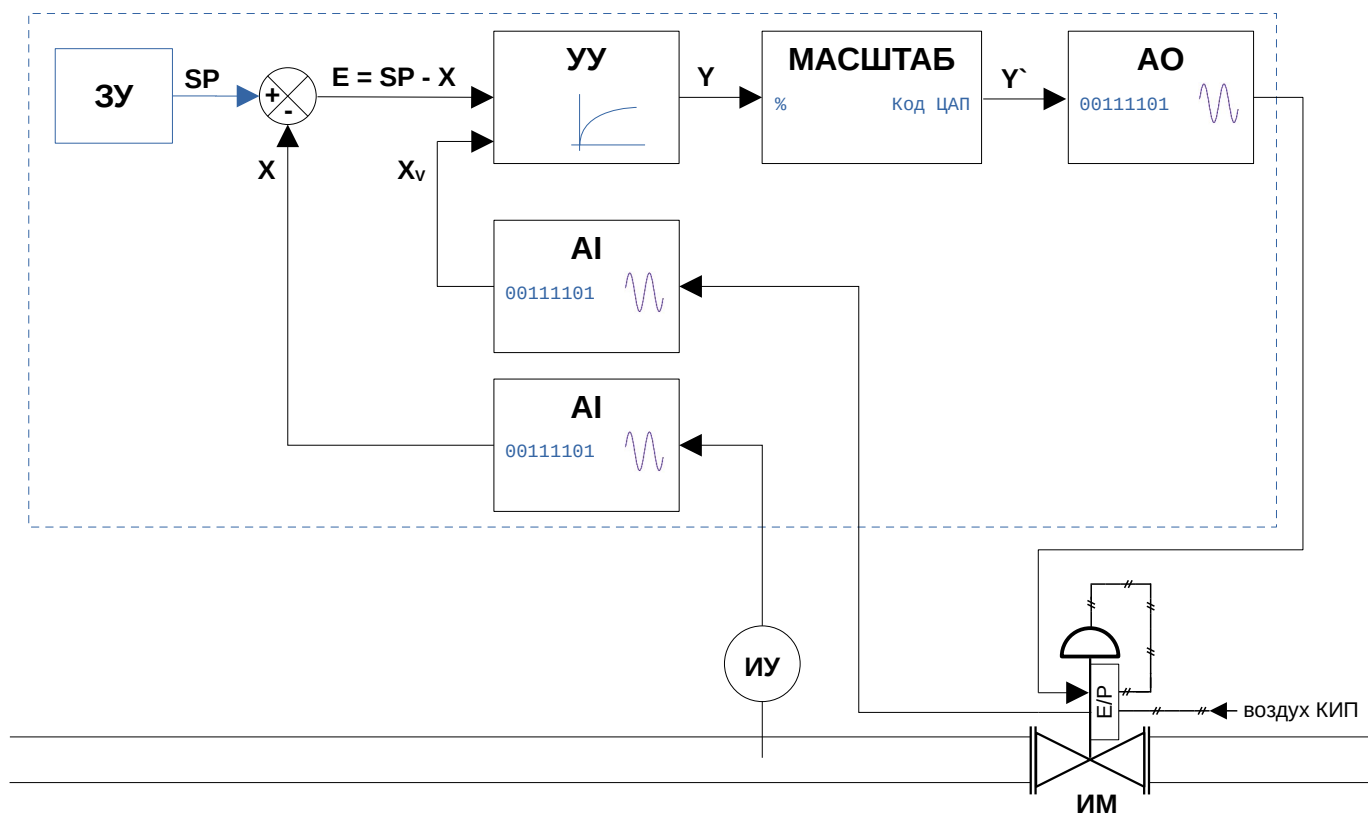
Если величина допуска не задана ($dE = 0$) и/или не задано время диагностики ($dETm = 0$), то процедура диагностики не выполняется.

КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

ПИД РЕГУЛЯТОР

Типовые структурные схемы

Аналоговый выход



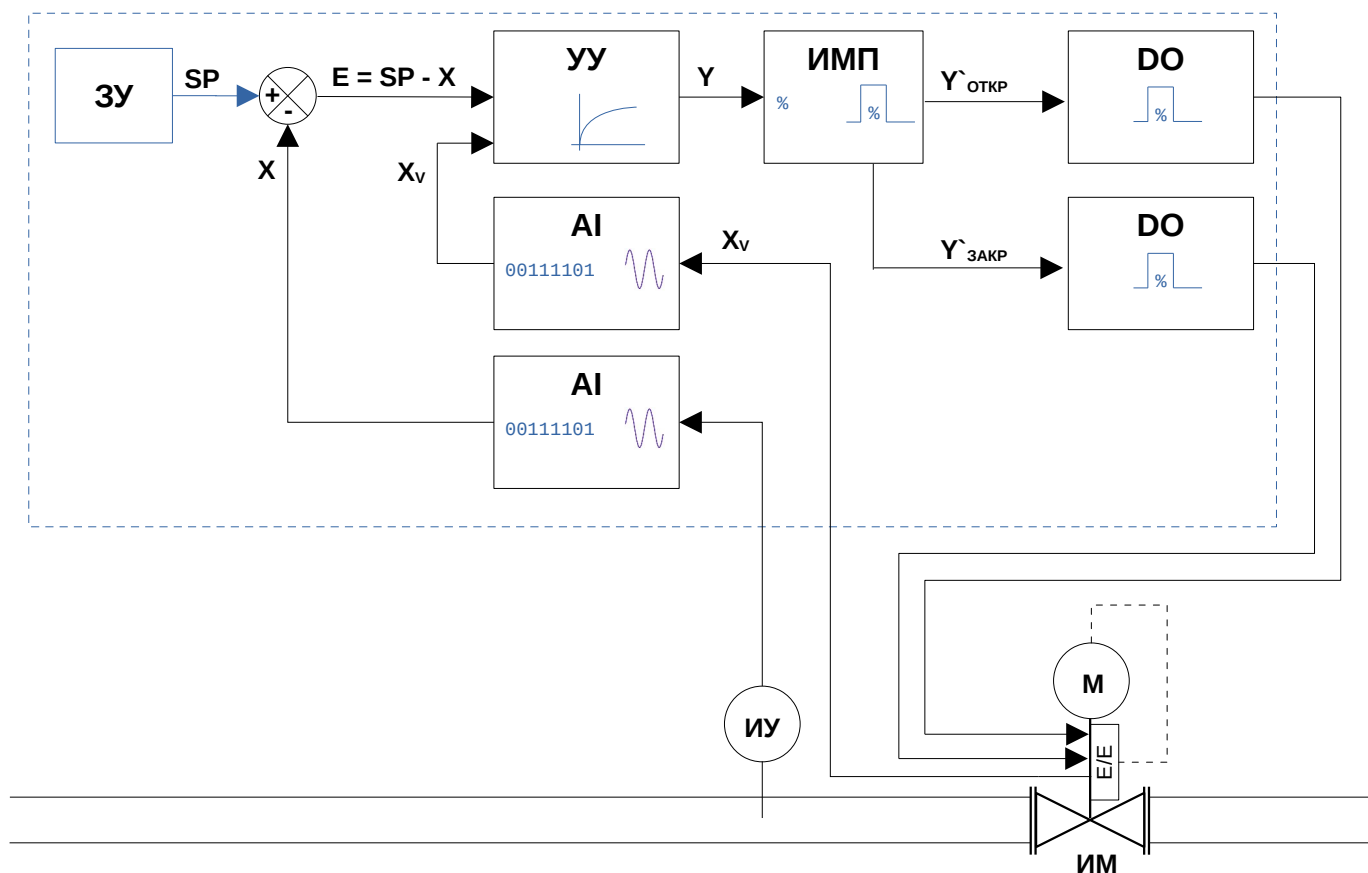
- ЗУ — задающее устройство (ввод уставки)
SP — уставка
E — ошибка регулирования (рассогласование)
УУ — устройство управления (ПИД-регулятор)
Y — управляющий сигнал (цифровой, % открытия задвижки)
МАСШТАБ — программное масштабирование (преобразование % в код ЦАП)
АО — канал аналогового вывода (ЦАП)
ИМ — исполнительный механизм (клапан регулирующий, пневматический, управление 4-20 мА, датчик положения задвижки 4-20 мА)
ИУ — измерительное устройство (датчик 4-20 мА)
AI — канал аналогового ввода (АЦП)
 X_v — обратная связь от ИМ
X — обратная связь от ИУ

Цифровой управляющий сигнал регулятора (Y, % открытия задвижки) подается в блок масштабирования, где он преобразовывается в код ЦАП. Полученный код подается в канал аналогового вывода (АО), где преобразуется в электрический аналоговый сигнал (4-20 мА). Аналоговый сигнал передается на вход позиционирующего устройства регулирующего клапана. Позиционирующее устройство преобразует электрический аналоговый управляющий сигнал в пневматический (Е/Р). Полученный пневматический сигнал воздействует на актуатор клапана, приводя задвижку в заданное положение.

КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

ПИД РЕГУЛЯТОР

Импульсный выход / ШИМ



- ЗУ — задающее устройство (ввод уставки)
SP — уставка
E — ошибка регулирования (рассогласование)
УУ — устройство управления (ПИД-регулятор)
Y — управляющий сигнал (цифровой, % открытия задвижки)
ИМП — задатчик импульсов (преобразование % в длительность импульса)
DO — канал дискретного вывода (0-24 В DC)
ИМ — исполнительный механизм (клапан регулирующий, электромеханический, управление дискретное 0-24 В DC, датчик положения задвижки 4-20 мА)
М — электропривод задвижки (шаговый двигатель)
ИУ — измерительное устройство (датчик 4-20 мА)
AI — канал аналогового ввода (АЦП)
 X_v — обратная связь от ИМ
X — обратная связь от ИУ

Цифровой управляющий сигнал регулятора (Y, % открытия задвижки) подается в блок задатчика импульсов, где преобразуется в длительность импульса. Полученная длительность импульса, в зависимости от алгоритма регулятора, подается в канал дискретного вывода (DO): на открытие или закрытие клапана. На выходе дискретного канала формируется электрический импульс заданной длительности. Импульс передается на соответствующий вход позиционирующего устройства регулирующего клапана. Позиционирующее устройство преобразует управляющий импульс в электрический сигнал электропривода (E/E). Электропривод начинает работать пока есть управляющий импульс, оказывая влияние на задвижку (открывать или закрывать с определенным шагом).

КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

ПИД РЕГУЛЯТОР

Методы настройки

Есть два подхода к настройке ПИД-регулятора:

- Синтез регулятора
- Экспериментальный

Синтез регулятора — это вычисление параметров регулятора на основе построенной модели системы. Этот метод позволяет очень точно рассчитать параметры регулятора, но он требует основательного погружения в теорию автоматического управления (ТАУ), а также освоения систем моделирования (например, Mathlab и т. п.).

Экспериментальный метод — ручной подбор параметров регулятора, когда:

- берется готовая система
- устанавливаются начальные значения параметров регулятора
- включается регулятор
- анализируется переходная характеристика
- в зависимости от того, как ведет себя система, подстраиваются параметры до требуемого поведения системы

Есть ряд экспериментальных методов, которые можно автоматизировать — запрограммировать алгоритм автоподстройки регулятора, который:

- сам запустит систему
- соберет все необходимые показания
- выключит систему
- выполнит все необходимые расчеты
- выдаст результат — параметры (коэффициенты) регулятора

Но, при любом подходе, необходимо понимать, на что отвечает тот или иной параметр (коэффициент) регулятора.

При увеличении K_P увеличивается скорость выхода на уставку (X), усиливается управляющий сигнал (Y). Чисто математически система не может прийти ровно к заданному значению, так как при приближении к установке P -составляющая пропорционально уменьшается. При дальнейшем увеличении K_P реальная система теряет устойчивость и начинаются колебания.

При увеличении K_I растет скорость компенсации накопившейся ошибки, что позволяет вывести систему точно к заданному значению с течением времени. Если система медленная, а K_I слишком большой — интегральная сумма сильно вырастет и произойдет перерегулирование, которое может иметь характер незатухающих колебаний с большим периодом. Поэтому интегральную сумму в алгоритме регулятора часто ограничивают, чтобы она не могла увеличиваться и уменьшаться до бесконечности.

При увеличении K_D растет стабильность системы, она не дает системе меняться слишком быстро. В то же время K_D может стать причиной неадекватного поведения системы и постоянных скачков управляющего сигнала, если значение с датчика «шумит». На каждое резкое изменение сигнала с датчика D -составляющая будет реагировать изменением управляющего сигнала, поэтому сигнал с датчика нужно фильтровать.

КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

ПИД РЕГУЛЯТОР

Далее будут рассмотрены наиболее часто используемые и относительно простые (без сложных математических вычислений) методы экспериментальной настройки регуляторов, где коэффициенты ПИД-регулятора подбираются по отдельности путем проб и ошибок. Процессы подбора здесь являются достаточно трудоемкими, так как требуют проведения некоторого количества испытаний.

Стоит отметить, что тот или иной метод работает не каждой системы.

Если какой-то из методов не дал требуемого результата, то стоит попробовать другой.

Положительный эффект может быть не самым оптимальным, но, при необходимости, качество регулирования можно попытаться повысить дальнейшей подстройкой коэффициентов (при этом, не забывать сохранять значения более-менее удовлетворяющих коэффициентов).

КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

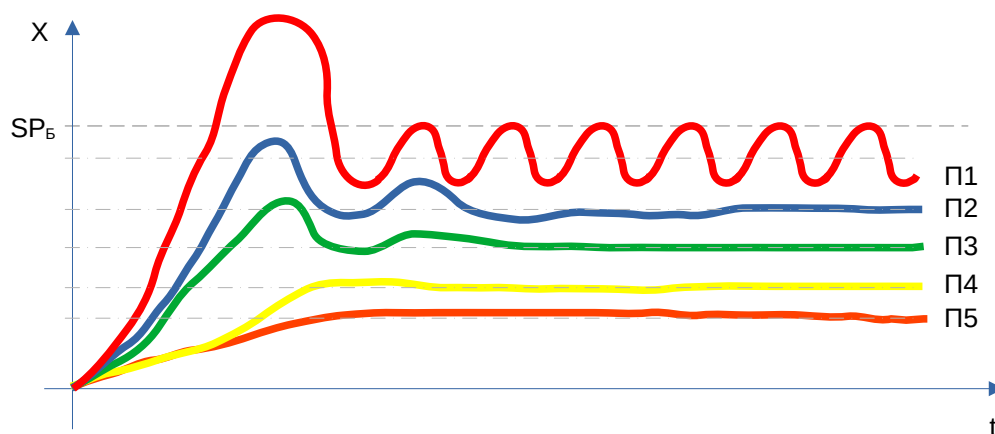
ПИД РЕГУЛЯТОР

Настройка методом анализа переходной характеристики

- 1) Перевести регулятор в Ручной режим
- 2) Дождаться пока процесс самостоятельно стабилизируется в Ручном режиме (или вручную довести его до более-менее стабильного состояния)
- 3) Задать Безопасное значение уставки
 $SP_B = (0,7 \dots 0,9) * SP$
где, SP — реальная (рабочая уставка)
- 4) Установить коэффициенты регулятора
 $K_P = 1.0$
 $K_I = K_D = 0.0$
- 5) Перевести регулятор в Автоматический режим

Настройка П-составляющей

- 6) Повышать значение коэффициента K_P
 - изменять с небольшим шагом приращения
 - после изменения сделать паузу:
 - дождаться отклика системы на изменение (начало переходного процесса)
 - дождаться установившегося режима (завершение переходного процесса)
 - провести анализ переходной характеристики



Характеристика П1:

- зона пропорциональности очень мала (значение K_P очень маленькое)
- переходная характеристика далека от оптимальной
- продолжить повышать K_P (возврат к п.6)

Характеристика П2:

- наблюдаются затухающие колебания (3-4 периода)
- если предполагается использовать Д-составляющую, то выбранное значение значения зоны пропорциональности считается оптимальным и настройка считается законченной (значение K_P удовлетворительное — переход к п.7)
- если не предполагается использовать Д-составляющую, то рекомендуется продолжить повышать K_P (возврат к п.6) до получения характеристик вида П3 или П4

КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

ПИД РЕГУЛЯТОР

Характеристика ПЗ:

- наблюдается небольшой выброс (перерегулирование) и быстро затухающие колебания (порядка 1-2 периода)
- в комплексе с другими составляющими регулятора при данной пропорциональной зоне можно получить хорошее быстрое действие и быстрый выход на уставку
- если в системе допускаются выбросы при смене уставки, то эта настройка считается оптимальной (значение K_P удовлетворительное — переход к п.7)
- если выбросы не допускаются (или они должны быть минимальными), то следует продолжить повышать K_P (возврат к п.6) до получения характеристики вида П4

Характеристика П4:

- наблюдается плавный выход на установившийся режим без выбросов и колебаний
- быстрое действие несколько снижено
- если в системе (в комплексе с другими составляющими регулятора) быстрое действие будет достаточным, то эта настройка считается оптимальной (значение K_P удовлетворительное — переход к п.7)
- если быстрое действие будет не достаточно, то следует уменьшать K_P до получения характеристики вида П3 (или П2)

Характеристика П5:

- сильно затянутый выход на установившийся режим
- зона пропорциональности сильно велика (значение K_P очень большое)
- переходная характеристика далека от оптимальной
- понижать K_P до получения характеристики вида П3 (или П4, или П2)

Следует обратить внимание на то, что во всех рассмотренных выше случаях установившееся значение в системе не совпадает с уставкой (наличие остаточного рассогласования является нормой для П-регулятора).

Также следует учитывать, что чем больше зона пропорциональности, тем:

- **больше остаточное рассогласование**
- **больше длительность переходного процесса**

Таким образом, нужно стремиться выбирать зону пропорциональности как можно меньше. Вместе с тем, остаточное рассогласование, характерное для чисто П-регуляторов, убирается интегральной (И-) составляющей регулятора.

КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

ПИД РЕГУЛЯТОР

Настройка Д-составляющей

Этот этап присутствует, если применяется полнофункциональный ПИД-регулятор. Если Д-составляющая применяться не будет, то следует пропустить этот этап.

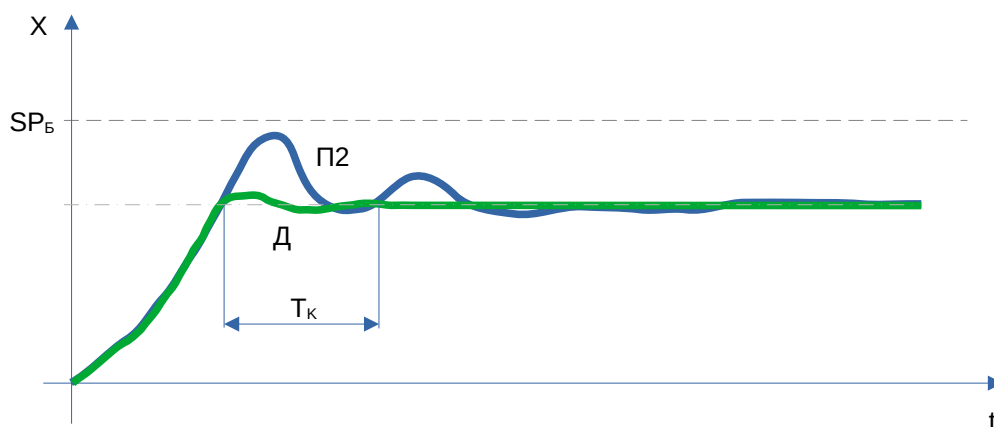
На предыдущем этапе была задана зона пропорциональности, соответствующая переходной характеристике вида П2, в которой присутствовали затухающие колебания.

Д-составляющая должна устранить выбросы (перерегулирования) и значительно сгладить затухающие колебания.

7) Изменять значение T_D

(в качестве первого приближения взять $T_D = 0,2 \cdot T_K$, T_K от П2)

- изменять с небольшим шагом
- после изменения сделать паузу:
 - дождаться отклика системы на изменение (начало переходного процесса)
 - дождаться установившегося режима (завершение переходного процесса)
 - провести анализ переходной характеристики



Характеристика Д:

- Д-составляющая устраняет выбросы, значительно сглаживая затухающие колебания, делая переходную характеристику, похожей на ПЗ; при этом, зона пропорциональности здесь меньше, чем для ПЗ — динамическая и статическая точности выше, чем только для П-регулятора (переход к п.8)

По завершении подбора T_D вычислить значение коэффициента K_D :

$$K_D = T_D$$

КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

ПИД РЕГУЛЯТОР

Настройка И-составляющей

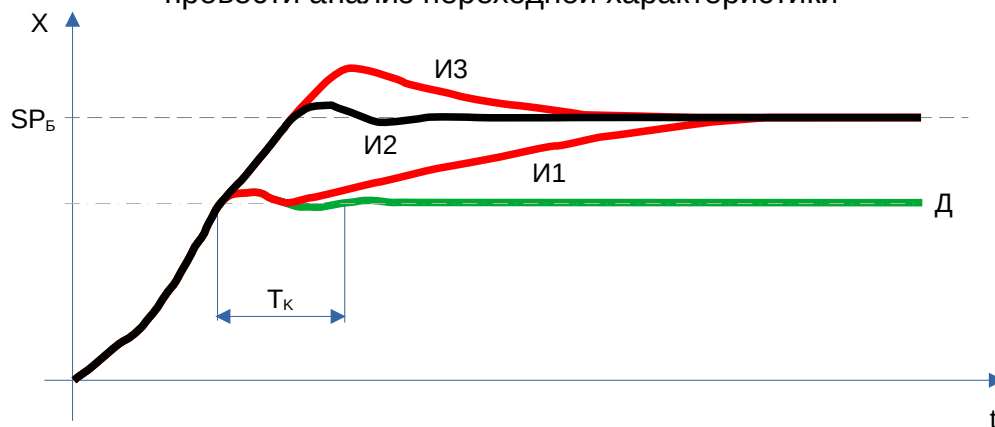
После настройки П-составляющей, должна была получиться (по рекомендации) характеристика ПЗ. Если была настроена и Д-составляющая, то должна была получиться характеристика Д.

И-составляющая должна устранить остаточное рассогласование, оставшееся от П-регулятора.

8) Изменять значение T_I

(в качестве первого приближения взять $T_I = T_K$, T_K от Д или ПЗ)

- изменять с небольшим шагом
- после изменения сделать паузу:
 - дождаться отклика системы на изменение (начало переходного процесса)
 - дождаться установившегося режима (завершение переходного процесса)
 - провести анализ переходной характеристики



Характеристика И1:

- сильно затянут выход на уставку
- постоянная времени интегрирования (T_I) очень большая

Характеристика И2:

- оптимальная

Характеристика И3:

- имеется выброс (перерегулирование) и затянутый выход на уставку после него
- постоянная времени интегрирования (T_I) очень маленькая (если постоянную времени интегрирования еще уменьшить, то в системе могут начаться колебания)

По завершении подбора T_I вычислить значение коэффициента K_I :

$$K_I = \frac{1}{T_I}$$

КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

ПИД РЕГУЛЯТОР

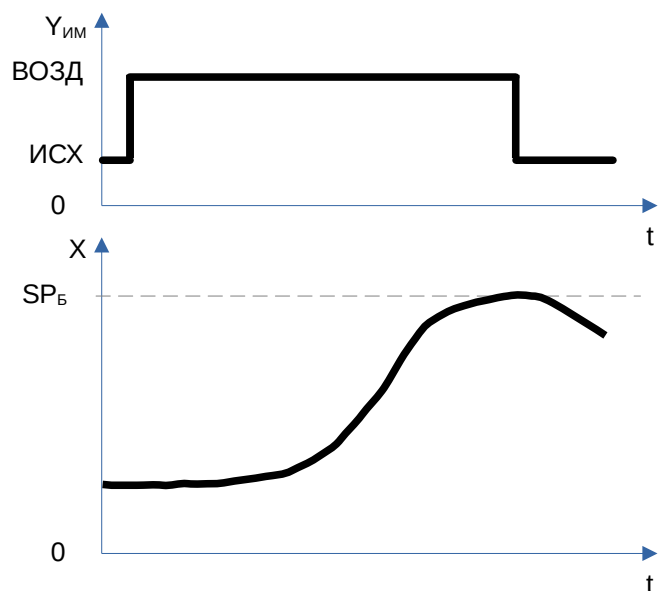
Настройка методом «Реакция системы на однократное воздействие»

- 1) Перевести регулятор в Ручной режим
- 2) Дождаться пока процесс самостоятельно стабилизируется в Ручном режиме (или вручную довести его до более-менее стабильного состояния)
- 3) Определить безопасную экспериментальную уставку ($SP_Б$), которая должна быть меньше реальной рабочей (SP), например:
 $SP_Б = (0,7...0,9) * SP$
- 4) Оказать (например, вручную) однократное (скачком) воздействие ($Y_{им}=ВОЗД$) на исполнительный механизм (например, за один раз увеличить на 5% от исходного: открытие клапана, мощность нагревательного элемента, частоту двигателя и т. п.), что обеспечит приемлемый отклик системы
- 5) Дождаться достижения контролируемого параметра (X) значения безопасной экспериментальной уставки ($SP_Б$)
- 6) Перевести исполнительный механизм в исходное состояние ($Y_{им}=ИСХ$)

Если оказанное (в п.4) однократное воздействие на исполнительный механизм не обеспечило приемлемый отклик системы (например, 5% было мало), то необходимо повторить эксперимент, но уже с большим воздействием. Повторять эксперимент только после достижения системой установившегося режима при исходном состоянии исполнительного механизма.

На всем протяжении выполнения эксперимента (достаточным является временной промежуток п.4-6) необходимо вести запись изменений значения контролируемого параметра (X). Каждое значение контролируемого параметра должно сопровождаться меткой времени (момент записи, t).

- 7) По учтенным значениям контролируемого параметра (X) и меток времени (t) построить график переходной характеристики



КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

ПИД РЕГУЛЯТОР

7) По переходной характеристике определить следующие показатели:

SP_B — безопасная уставка

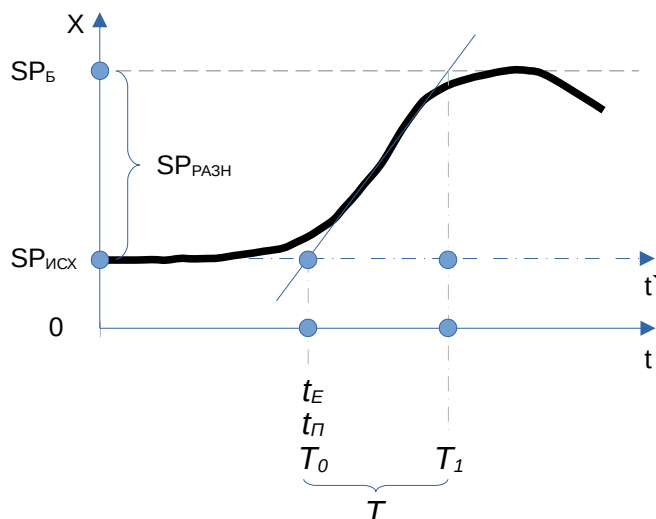
От точки SP_B провести линию, параллельную оси времени (t)

$SP_{ИСХ}$ — начальное значение контролируемого параметра (X), т.е. при исходном положении исполнительного механизма ($Y_{ИМ}=ИСХ$)

$SP_{РАЗН}$ — разностная уставка:

$$SP_{РАЗН} = SP_B - SP_{ИСХ}$$

Так как, начальное значение контролируемого параметра (X) может быть смещено относительно нуля, то все остальные параметры, касающиеся контролируемого параметра, будут определяться с учетом этого смещения. Поэтому, для удобства, из точки $SP_{ИСХ}$ проводим мнимую ось времени (t'), параллельную исходной оси (t).



Все значения, связанные со временем (включая и временные метки по оси t), необходимо приводить к единым размерностям (например, к миллисекундам — 1 сек = 1000 мсек).

T — постоянная времени объекта

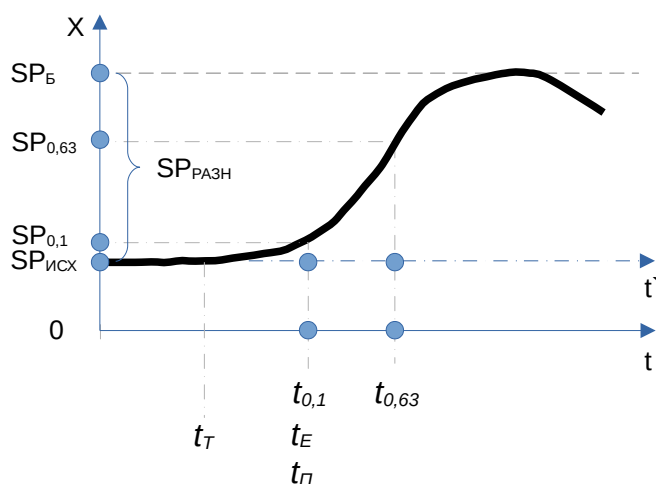
Постоянная времени объекта по касательной к кривой разгона

- Провести касательную к кривой разгона
- Найти точку пересечения касательной и мнимой оси времени (t')
- От этой точки опустить перпендикуляр на ось времени (t)
 - это конец емкостного запаздывания (t_E)
 - или конец полного запаздывания (t_n)
 - или начало постоянной времени объекта (T_0)
- Определить значение времени для этой точки (T_0)
- Найти точку пересечения касательной и линии уставки (SP_B)
- От этой точки опустить перпендикуляр на ось времени (t)
 - это конец постоянной времени объекта (T_1)
- Определить значение времени для этой точки (T_1)
- Вычислить значение постоянной времени объекта:

$$T = T_1 - T_0$$

КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

ПИД РЕГУЛЯТОР



Постоянная времени объекта по измеренным значениям $X(t)$

- По известным значениям $SP_{ИСХ}$ и $SP_{Б}$ определить значения точек $SP_{0,1}$ и $SP_{0,63}$:

$$SP_{0,1} = (0,1 \cdot SP_{ПАЗН}) + SP_{ИСХ}$$

$$SP_{0,63} = (0,63 \cdot SP_{ПАЗН}) + SP_{ИСХ}$$

- Для найденных значений точек $SP_{0,1}$ и $SP_{0,63}$ определить соответствующие им временные метки $t_{0,1}$ (соответствует t_E и $t_П$) и $t_{0,63}$
- По найденным выше значениям можно достаточно точно вычислить значение постоянной времени объекта:

$$T = t_{0,63} - t_T$$

где, t_T — транспортное запаздывание, которое с незначительными погрешностями можно определить, зная полное запаздывание $t_П$

$$t_T \approx \frac{t_П}{2}$$

таким образом:

$$T = t_{0,63} - \left(\frac{t_П}{2}\right)$$

R — максимальная скорость изменения контролируемого параметра (X) или наклон переходной характеристики:

$$R = \frac{SP_{ПАЗН}}{T}$$

8) Вычислить коэффициенты регулятора по следующим формулам:

Тип регулятора	K_P	K_I	K_D
П	$\left(\frac{1,0}{R \cdot t_П}\right)$		
ПИ	$0,8 \cdot \left(\frac{1,0}{R \cdot t_П}\right)$	$2,0 \cdot t_П$	

КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

ПИД РЕГУЛЯТОР

Тип регулятора	K_P	K_I	K_D
ПД	$\left(\frac{1,0}{R \cdot t_{II}}\right)$		$0,25 \cdot t_{II}$
ПИД	$1,2 \cdot \left(\frac{1,0}{R \cdot t_{II}}\right)$	$2,0 \cdot t_{II}$	$0,4 \cdot t_{II}$

Данный метод можно автоматизировать, реализовав (запрограммировав) в виде функционального блока «Автонастройка ПИД-регулятора»:

1) На вход алгоритма подаются:

- уставка (SP_B)
- тип регулятора
- $Y_{ИСХ}$ (например, 0%)
- $Y_{ВОЗД}$ (например, 100%)
- команда ПУСК

2) При появлении команды ПУСК:

- $Y_{ИМ} = Y_{ВОЗД}$
- Автоматически выполняются измерения и вычисления:
 - на 1-м цикле работы (в момент запуска)
 $SP_{ИСХ} = X$
 $SP_{РАЗН}$ (вычисляется)
 $SP_{0,1}$ (вычисляется)
 $SP_{0,63}$ (вычисляется)
 - когда X достигло $SP_{0,1}$
 $t_{II} = t$
 - когда X достигло $SP_{0,63}$
 $Y_{ИМ} = Y_{ИСХ}$ (СТОП)
 $t_{0,63} = t$
 T (вычисляется)
 R (вычисляется)

в зависимости от типа регулятора вычисляются коэффициенты

3) На выходе алгоритма:

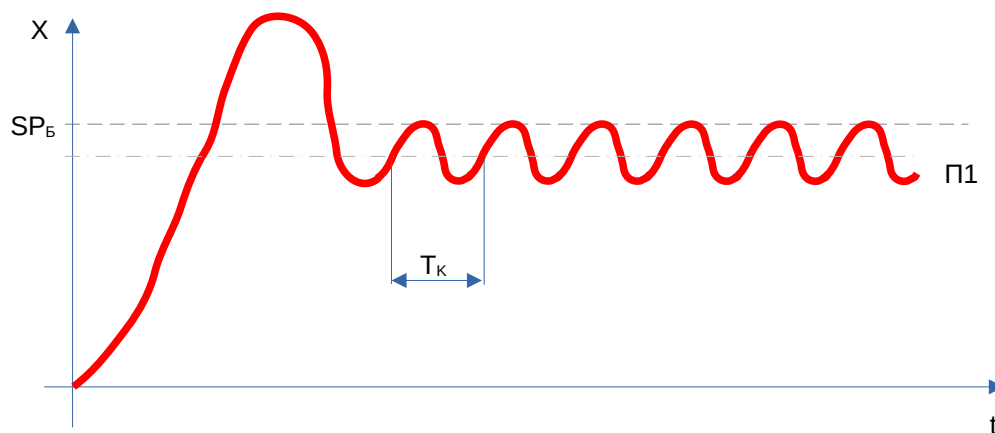
- код состояния (РАБОТА, ОСТАНОВ)
- текущее значение X
- $SP_{ИСХ}$
- $SP_{РАЗН}$
- $SP_{0,1}$
- $SP_{0,63}$
- $t_{0,1}$
- $t_{0,63}$
- T
- R
- K_P
- K_I
- K_D

КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

ПИД РЕГУЛЯТОР

Настройка методом «Зиглера-Николсона»

- 1) Перевести регулятор в Ручной режим
- 2) Дождаться пока процесс самостоятельно стабилизируется в Ручном режиме (или вручную довести его до более-менее стабильного состояния)
- 3) Задать Безопасное значение уставки
 $SP_B = (0,7 \dots 0,9) \cdot SP$
где, SP — реальная (рабочая уставка)
- 4) Установить коэффициенты регулятора
 $K_P = 1.0$
 $K_I = K_D = 0.0$
- 5) Перевести регулятор в Автоматический режим
- 6) Повышать значение коэффициента K_P
 - изменять с небольшим шагом приращения
 - после изменения сделать паузу:
 - дождаться отклика системы на изменение (начало переходного процесса)
 - дождаться установившегося режима (завершение переходного процесса)
 - провести анализ переходной характеристики



Характеристика П1:

- наблюдается незатухающий автоколебательный процесс
- определить период незатухающих колебаний (T_K)
- полученное значение K_P обозначить как K_{P0} (переход к п.7)

- 7) Вычислить коэффициенты регулятора по следующим формулам:

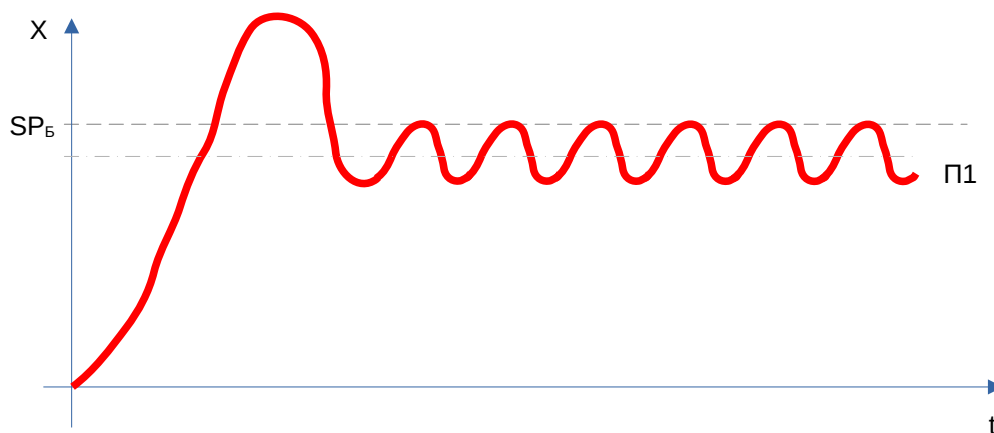
Тип регулятора	K_P	K_I	K_D
П	$0,5 \cdot K_{P0}$		
ПИ	$0,45 \cdot K_P$	$1,2 \cdot \frac{K_P}{T_K}$	
ПИД	$0,6 \cdot K_P$	$2,0 \cdot \frac{K_P}{T_K}$	$K_P \cdot \frac{T_K}{8}$

КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

ПИД РЕГУЛЯТОР

Настройка методом быстрого подбора

- 1) Перевести регулятор в Ручной режим
- 2) Дождаться пока процесс самостоятельно стабилизируется в Ручном режиме (или вручную довести его до более-менее стабильного состояния)
- 3) Задать Безопасное значение уставки
 $SP_B = (0,7 \dots 0,9) * SP$
где, SP — реальная (рабочая уставка)
- 4) Установить коэффициенты регулятора
 $K_P = 1.0$
 $K_I = K_D = 0.0$
- 5) Перевести регулятор в Автоматический режим
- 6) Повышать значение коэффициента K_P
 - изменять с небольшим шагом приращения
 - после изменения сделать паузу:
 - дождаться отклика системы на изменение (начало переходного процесса)
 - дождаться установившегося режима (завершение переходного процесса)
 - провести анализ переходной характеристики



Характеристика П1:

- наблюдается незатухающий автоколебательный процесс
- данный этап настройки K_P считается завершенным
- полученное значение K_P обозначаем как K_{P0} (переход к п.7)

- 7) Вычислить коэффициент K_P :
$$K_P = \frac{K_{P0}}{2}$$

- 8) Увеличивать K_I , пока в системе не начнется незатухающий автоколебательный процесс

$$K_I = \frac{K_I}{2}$$

- 9) Увеличивать K_D , пока в системе не начнется незатухающий автоколебательный процесс

$$K_D = \frac{K_D}{2}$$