

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ

Повный Андрей Владимирович, преподаватель Филиала УО Белорусский государственный технологический университет "Гомельский государственный политехнический колледж"

Школа для электрика: <https://electricalschool.info/>

Автоматизация производственных процессов:

<https://electricalschool.info/automation/>

Канал в Telegram: <https://t.me/electricalschool>

Фундаментальные подходы к управлению техническими процессами

Для глубокого понимания систем автоматизации в контексте КИПиА необходимо различать два принципиально противоположных подхода к управлению технологическими процессами: управление в разомкнутой системе и управление в замкнутой системе с обратной связью. Этот выбор определяет архитектуру системы автоматизации, её надежность, стоимость и применимость для конкретных технологических задач.

Системы управления разомкнутого типа (управление по возмущению)

Система управления разомкнутого типа функционирует без обратной связи от объекта управления к регулятору. Система анализирует входные условия (возмущения) и на основе предварительно вычисленной внутренней модели про-

цесса выдает заранее определенную последовательность команд исполнительным механизмам. Управляющее воздействие зависит исключительно от входных условий и не корректируется по результатам воздействия на объект.

Практический пример. Классическим примером разомкнутой системы служит программируемый таймер современной стиральной машины. Пользователь выбирает программу стирки и нажимает кнопку старта. Машина выполняет фиксированную, заранее запрограммированную последовательность операций: наполнение водой - 10 минут, основная стирка - 30 минут, полоскание - 15 минут, отжим - 5 минут. Эта последовательность выполняется независимо от того, насколько грязным было белье в начале цикла, какова температура водопроводной воды, какова жесткость воды и другие факторы, влияющие на эффективность стирки.

Преимущества разомкнутых систем:

- **Простота конструкции и реализации** - не требуется сложная система обратной связи и дорогостоящие датчики;
- **Низкая стоимость** - отсутствие необходимости в высокоточных датчиках и обработки их сигналов;
- **Надежность в простых операциях** - система не может "зациклиться" или стать неустойчивой, так как не имеет обратной связи;
- **Высокая скорость отклика** - нет задержки на измерение, обработку и принятие решения.

Недостатки и ограничения разомкнутых систем:

Разомкнутые системы уязвимы к любым отклонениям от предположенных номинальных условий. Если в примере со стиральной машиной белье было исключительно грязным, фиксированное время стирки может оказаться недостаточным. Если температура водопроводной воды оказалась значительно ниже ожидаемой (летом вода холоднее, чем зимой), эффективность стирки существенно снижается. Если произойдет засорение фильтра подачи воды и скорость наполнения барабана уменьшится, машина может не заполниться полностью за отведенное время.

Точность разомкнутых систем полностью определяется точностью модели процесса и предположений об условиях работы. Любые непредвиденные возмущения (отклонения от предполагаемых условий) приводят к ошибкам регулирования и невозможности достижения требуемого качества управления.

В промышленности разомкнутые системы применяются в основном для простых операций с предсказуемыми условиями, где требуется минимизировать стоимость и сложность, например: автоматическое дозирование химических реагентов в пропорциях, жестко связанных с расходом основного потока, простые системы задержки включения оборудования.

Системы управления замкнутого типа (управление по отклонению)

Система управления замкнутого типа использует обратную связь для непрерывного контроля результата достигнутого управляющим воздействием и динамической корректировки этого воздействия. Датчик постоянно измеряет текущее состояние объекта управления, регулятор сравнивает это значение с желаемым (заданным), и если обнаруживается отклонение, регулятор вырабатывает управляющий сигнал, направленный на уменьшение этого отклонения.

Практический пример. Система автоматического регулирования температуры в комнате квартиры. Требуемая температура в спальне установлена на 20°C . Датчик температуры (термодатчик) непрерывно измеряет текущую температуру воздуха в комнате. Электронный регулятор сравнивает текущее значение с заданием (20°C). Если температура упала ниже 20°C (например, до 18°C), регулятор получает информацию об отклонении (-2°C) и выдает команду на открытие клапана подачи горячей воды в радиатор отопления. Горячая вода начинает циркулировать через радиатор, тот нагревается, и температура в комнате начинает возрастать. По мере приближения температуры к 20°C регулятор начинает уменьшать открытие клапана. Когда температура достигает 20°C , клапан полностью закрывается. Если ночью через плохо закрытое окно начинает дуть холодный воздух, датчик немедленно обнаруживает снижение температуры, и процесс повторяется. Система постоянно корректирует свои действия, поэтому в итоге поддерживается именно желаемая температура, независимо от колебаний температуры на улице, наличия сквозняков, количества включенных электроприборов, выделяющих тепло, и других возмущений.

Преимущества замкнутых систем:

- **Высокая точность и стабильность** - система постоянно корректирует ошибки, поэтому регулируемая величина остается близка к заданию;
- **Адаптивность** - система автоматически приспосабливается к изменяющимся условиям, компенсируя неизвестные или непредсказуемые возмущения;
- **Устойчивость к погрешностям модели** - система не требует высокой точности модели процесса, так как обратная связь обеспечивает автоматическую коррекцию;

- **Минимизация влияния помех** - высокочастотные шумы в датчике подавляются интеграцией и фильтрацией;

- **Улучшение линейности** - система с обратной связью имеет более линейную передаточную характеристику по сравнению с объектом без обратной связи.

Недостатки и ограничения замкнутых систем:

- **Повышенная сложность и стоимость** - требуется высокоточный датчик, передатчик сигнала, регулятор, исполнительный механизм;

- **Задержки в контуре обратной связи** - датчик имеет инерцию (время отклика), сигнал передается не мгновенно, регулятор требует времени на принятие решения. Эти задержки могут привести к неустойчивости при неправильной настройке регулятора;

- **Возможность неустойчивости** - неправильно настроенная замкнутая система может начать "колебаться" или "качаться" вокруг заданного значения с возрастающей амплитудой, что недопустимо;

- **Зависимость от качества датчика** - погрешности и дрейф датчика могут привести к систематической ошибке регулирования.

Гибридные системы управления

На практике часто используются **гибридные подходы**, сочетающие преимущества разомкнутого и замкнутого управления. Типовая структура гибридной системы состоит из:

1. **Основного замкнутого контура регулирования** - обеспечивает основной контроль регулируемой величины и компенсацию неизвестных возмущений;

2. **Дополнительных разомкнутых компенсирующих цепей** - для предварительной компенсации известных возмущений, облегчая работу основного контура.

Пример гибридной системы. В системе регулирования температуры котла для теплоснабжения многоквартирного дома используется основной замкнутый контур регулирования, который поддерживает температуру теплоносителя на выходе котла. Кроме того, в систему добавлена разомкнутая компенсирующая цепь, которая автоматически увеличивает температуру теплоносителя при снижении температуры на улице и уменьшает при повышении температуры на улице. Это предварительное воздействие облегчает работу основного регулятора, снижая необходимые корректировки и повышая стабильность системы.

Структура и компоненты замкнутой системы автоматического регулирования

Замкнутая система автоматического регулирования представляет собой совокупность функционально взаимосвязанных элементов, образующих единое целое для достижения цели управления - поддержания регулируемой величины на заданном уровне несмотря на возмущения.

Основные функциональные элементы системы

Объект управления (управляемая система)

Объект управления - это технологический процесс, устройство или агрегат, на который воздействует система регулирования. На объект управления одновременно действуют:

- **Управляющее воздействие (u)** - сигнал, формируемый регулятором, направленный на изменение регулируемой величины в желаемом направлении;

- **Возмущающие воздействия (d)** - случайные или неконтролируемые факторы, изменяющие регулируемую величину в нежелательном направлении.

Примеры объектов управления:

- **Котел для отопления** - объект регулирования температуры теплоносителя;

- **Компрессор с ресивером** - объект регулирования давления сжатого воздуха;

- **Расходный насос** - объект регулирования расхода или уровня жидкости;

- **Электрический нагреватель** - объект регулирования температуры;

- **Технологический реактор** - объект регулирования температуры, давления, состава смеси.

На выходе объекта управления формируется **регулируемая величина (y)** - физическая величина, которую необходимо поддерживать на определенном уровне. Это может быть температура, давление, расход, уровень, влажность, концентрация вещества и т.д.

Датчик (первичный преобразователь)

Датчик - устройство, которое воспринимает регулируемую величину (обычно физическую: температуру, давление, расход) и преобразует её в сигнал, удобный для передачи и обработки. На выходе датчика формируется **первичный сигнал**, который обычно имеет малую величину (миллиампер, милливольт) и требует усиления и стандартизации.

Типы датчиков по принципу действия:

Тип датчика	Первичный сигнал	Применение
Терморезистор (RTD)	Изменение сопротивления (0-100 Ом)	Измерение температуры
Термопара	Электродвижущая сила (0-100 мВ)	Широкий диапазон температур
Датчик давления (пьезорезистивный)	Напряжение (0-5 В) или ток (4-20 мА)	Измерение давления газа или жидкости
Ротаметр (расходомер)	Перепад давления на поплавке	Визуальное измерение расхода жидкости
Электромагнитный расходомер	ЭДС в магнитном поле (0-10 мВ)	Измерение расхода электропроводной жидкости
Датчик уровня (поплавок)	Изменение сопротивления или положение контакта	Определение уровня жидкости

Передачик (вторичный преобразователь)

Передачик (или вторичный преобразователь) - устройство, которое усиливает первичный сигнал от датчика, нормализует его и выдает **стандартный сигнал**, пригодный для передачи на расстояние и для ввода в регулятор.

Стандартные сигналы в промышленности:

- **Унифицированный токовый сигнал 4-20 мА** - самый распространенный в промышленности. Диапазон 4-20 мА означает, что при минимальном значении регулируемой величины выдается ток 4 мА, при максимальном - 20 мА.

Значение 0 мА указывает на разрыв проводника или неисправность датчика. Преимущества: высокая помехозащищенность, возможность передачи на большие расстояния (100 м и более), самодиагностика (разрыв цепи).

- **Напряжение 0-10 В постоянного тока** - используется на коротких расстояниях (до 10 м) в менее требовательных приложениях. Более восприимчив к помехам и шумам.

- **Напряжение ± 5 В или ± 10 В** - применяется в некоторых аналоговых системах, особенно при использовании симметричных сигналов.

- **Цифровые сигналы** - в современных системах все чаще используются передатчики с цифровым выходом (протоколы RS-485, Modbus, Hart, Profibus), что обеспечивает большую точность и функциональность.

Физическое размещение передатчика:

Передатчик может быть:

- **Встроен в датчик** - составляет единое неразборное устройство (например, современные датчики давления обычно содержат встроенный преобразователь и выдают сигнал 4-20 мА);

- **Выполнен в виде отдельного прибора** - устанавливается рядом с датчиком и подключается к нему кабелем (например, преобразователь сопротивления для терморезистора).

Регулятор

Регулятор - это устройство (обычно электронное), которое осуществляет управление процессом на основе сравнения текущего значения регулируемой величины с желаемым (заданным) значением.

Основная функция регулятора:

1. **Получение сигнала от датчика** - прием стандартного сигнала (4-20 мА, 0-10 В или цифрового);
2. **Установка желаемого значения (задания, setpoint)** - оператор устанавливает, какое значение должна иметь регулируемая величина;
3. **Вычисление ошибки регулирования** - разница между текущим значением и заданием:

$$e(t) = y_{set} - y(t)$$

где $e(t)$ - ошибка регулирования, y_{set} - заданное значение, $y(t)$ - текущее значение;

4. **Выработка управляющего сигнала** - на основе ошибки регулирования регулятор вычисляет управляющий сигнал, используя один из законов регулирования (пропорциональный, интегральный, дифференциальный или их комбинацию);
5. **Выдача управляющего сигнала** - регулятор передает вычисленный сигнал на исполнительный механизм.

Типы регуляторов:

- **Пневматические регуляторы** - использовали сжатый воздух для управления, применялись исторически, ныне практически вытеснены электронными;
- **Электронные регуляторы** - используют электронные схемы или микропроцессоры для вычисления управляющего сигнала. Подавляющее большинство современных регуляторов являются электронными;

- **Встроенные регуляторы** - интегрированы в датчик-передатчик или в контроллер (например, в ПЛК).

Исполнительный механизм (привод)

Исполнительный механизм (или привод, actuator) - преобразует управляющий сигнал от регулятора в физическое воздействие на объект управления. Исполнительный механизм должен быстро реагировать на сигнал регулятора, иметь достаточную мощность и быть надежным.

Типы исполнительных механизмов:

- **Пневматические приводы** - используют сжатый воздух. Характеристики: быстрый отклик, безопасность (нет электрического тока), простота конструкции, требуют источника сжатого воздуха;

- **Гидравлические приводы** - используют жидкость под давлением. Характеристики: способны развивать большие силы, применяются для мощных механизмов, сложнее в обслуживании, возможны утечки;

- **Электрические приводы** - используют электромагниты или электромоторы. Характеристики: просты в управлении, широко доступны, легко интегрируются в электронные системы, могут работать удаленно;

- **Комбинированные приводы** - сочетают несколько принципов, например, электропневматические клапаны (электромагнит управляет пневматическим золотником).

Регулирующий орган

Регулирующий орган - это элемент, через который исполнительный механизм оказывает прямое воздействие на объект управления. Примеры регулирующих органов:

- **Запорно-регулирующий клапан** - изменяет расход теплоносителя или рабочей жидкости через трубопровод;
- **Электрический контактор** - включает или отключает питание нагревателя, насоса или другого электрооборудования;
- **Дроссель в электрической цепи** - изменяет напряжение или ток в электрической схеме;
- **Заслонка в вентиляционном канале** - регулирует количество воздуха, проходящего через канал;
- **Направляющий клапан (золотник)** - в гидравлических системах управляет направлением потока жидкости.

Обратная связь

Обратная связь - путь передачи информации о достигнутом результате от выхода объекта управления (через датчик и передатчик) обратно к входу регулятора. Обратная связь замыкает контур управления, обеспечивая возможность регулятору "знать" о текущем состоянии объекта и корректировать свои действия.

Отрицательная обратная связь - информация о выходе используется для уменьшения входного сигнала (ошибки). Это стабилизирующая обратная связь, которая используется в системах регулирования.

Положительная обратная связь - информация о выходе используется для увеличения входного сигнала. В чистом виде положительная обратная связь приводит к неустойчивости и не используется в системах регулирования, однако в небольших дозах может улучшить скорость реакции системы.

Устойчивость систем регулирования

Определение и физический смысл устойчивости

Система регулирования называется устойчивой, если после возникновения возмущения (отклонения регулируемой величины от заданного значения) она снова возвращается к первоначальному состоянию равновесия и поддерживает регулируемую величину на заданном уровне.

Неустойчивая система, наоборот, после возмущения отклоняется всё дальше и дальше от желаемого состояния, обычно вплоть до срабатывания предохранительных устройств или выхода системы из строя.

Практический пример: система регулирования температуры в доме

Рассмотрим три сценария работы системы отопления, демонстрирующие различные типы поведения:

Сценарий 1: Устойчивая система (нормально настроенный регулятор)

Требуемая температура в доме установлена на 20°C . На улице внезапно похолодало (возмущение), и температура на улице упала с $+10^{\circ}\text{C}$ до 0°C . Датчик немедленно регистрирует, что температура в доме упала ниже 20°C , например до 19°C . Регулятор, чувствуя отклонение в -1°C , максимально открывает клапан подачи горячей воды. Температура начинает возрастать. По мере приближения к

20°C регулятор постепенно уменьшает открытие клапана. Когда температура достигает 20°C, клапан практически полностью закрывается.

Однако из-за инерции процесса (тепловой инерции здания) температура слегка превышает 20°C, поднимаясь до 20.5°C. Регулятор немедленно реагирует, уменьшая подачу тепла, и температура начинает снижаться. Эти небольшие колебания (от 19.5°C до 20.5°C) быстро затухают, и система стабилизируется, поддерживая температуру в узком диапазоне около 20°C. **Это устойчивая система.**

Сценарий 2: Неустойчивая система (регулятор настроен слишком чувствительно)

Допустим, регулятор настроен так, что при малейшем отклонении он максимально открывает или закрывает клапан, не учитывая накопленный эффект. Температура упала до 19°C. Регулятор максимально открывает клапан. Тепло начинает поступать, но регулятор не "ослабляет хватку", не снижает открытие клапана при приближении к заданию. Температура быстро возрастает и превышает 20°C, поднимаясь до 21°C, затем 22°C. Теперь регулятор, "разозлившись" на перерегулирование, максимально закрывает клапан. Тепло прекращает поступать, температура начинает снижаться и падает ниже 20°C, опускаясь до 18°C, затем 17°C. Регулятор снова максимально открывает клапан. Процесс повторяется, и система начинает "качаться" вокруг желаемого значения с возрастающей амплитудой: 19°C → 22°C → 17°C → 23°C → 16°C и т.д. **Это неустойчивая система, требующая переналадки.**

Сценарий 3: Критически затухающая система (граница устойчивости)

Регулятор настроен так, что после возмущения система выполняет одно-два колебания с уменьшающейся амплитудой, затем стабилизируется. Температура упала до 19°C, регулятор открывает клапан, и температура возрастает, но

регулятор постепенно ослабляет открытие. Температура поднимается до 20.3°C (небольшое перерегулирование), затем начинает снижаться. Второе колебание меньше: температура опускается до 19.7°C , затем поднимается до 20.1°C . Третье колебание еще меньше. Система быстро стабилизируется около 20°C . **Это хорошо настроенная система**, обеспечивающая баланс между скоростью реакции и стабильностью.

Математическое описание устойчивости

В теории управления устойчивость системы определяется расположением полюсов передаточной функции замкнутой системы в комплексной плоскости. Система устойчива, если все полюсы передаточной функции расположены в левой полуплоскости (имеют отрицательную действительную часть). Если хотя бы один полюс расположен в правой полуплоскости или на мнимой оси, система неустойчива.

Практические критерии устойчивости:

Критерий Рауса-Гурвица - алгебраический критерий, позволяющий определить устойчивость системы по коэффициентам характеристического полинома.

Критерий Найквиста - графический критерий, основанный на анализе амплитудно-фазовой характеристики разомкнутой системы.

Критерий Боде - графический критерий, основанный на анализе логарифмических амплитудных и фазовых характеристик.

Показатели качества регулирования

Качество работы системы автоматического регулирования оценивается по нескольким взаимосвязанным критериям, часто противоречащим друг другу.

Точность регулирования

Точность - насколько хорошо система поддерживает регулируемую величину на желаемом значении. Выражается в процентах от диапазона или в абсолютных единицах.

Статическая ошибка (установившаяся ошибка) - отклонение регулируемой величины от заданного значения в установившемся режиме после завершения переходного процесса. Для хорошо настроенной системы статическая ошибка должна быть как можно меньше (обычно менее 1% для систем с интегральной составляющей регулятора, и несколько процентов для чисто пропорциональных систем).

Динамическая ошибка - отклонение регулируемой величины от заданного значения во время переходного процесса (после возмущения или смены задания).

Пример требований к точности:

- Система регулирования температуры жидкости в химическом реакторе: $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ (высокая точность необходима, так как даже небольшие колебания температуры могут нарушить ход химической реакции).
- Система регулирования комнатной температуры в доме: $\pm 1^{\circ}\text{C}$ (людям обычно комфортно при температуре в диапазоне $19-21^{\circ}\text{C}$).
- Система регулирования давления в ресивере: ± 0.1 МПа (для предотвращения срабатывания предохранительных клапанов).

Скорость реакции

Скорость реакции (динамическая скорость, responsiveness) - насколько быстро система реагирует на изменения входного сигнала или возмущение.

Быстрая система реагирует за секунды (система регулирования давления воздуха, электрического напряжения).

Медленная система может реагировать за минуты или даже часы (система регулирования температуры в большом здании, система регулирования уровня в крупном резервуаре).

Обычно требуется найти компромисс между скоростью и точностью:

- Если регулятор настроен на высокую скорость реакции (большой коэффициент усиления), система быстро реагирует на изменения, но вероятность колебаний и перерегулирования возрастает.
- Если регулятор настроен на высокую точность (малый коэффициент усиления), колебания минимальны, но система медленно реагирует на изменения.

Стабильность переходного процесса

Стабильность переходного процесса характеризует, как быстро система достигает установившегося состояния после возмущения.

Время установления - время, за которое переходный процесс практически завершается, и регулируемая величина остается в пределах $\pm 5\%$ от установившегося значения. Типичные значения: от миллисекунд до минут, в зависимости от инерции объекта.

Пример: если система регулирования давления имеет время установления 2 секунды, это означает, что после возмущения давление возвращается в пределы $\pm 5\%$ от заданного значения за 2 секунды.

Перерегулирование

Перерегулирование - явление, при котором регулируемая величина кратковременно превосходит желаемое значение прежде чем установиться на нем. Это результат "переусердствования" регулятора, который выдает слишком мощное управляющее воздействие из-за инерции системы.

Конкретный пример перерегулирования

Система отопления должна поддерживать температуру 20°C . На улице похолодало, температура в доме упала до 18°C . Регулятор, чувствуя отклонение (-2°C), максимально открывает клапан подачи горячей воды. Тепло начинает поступать в радиаторы. Однако из-за тепловой инерции дома (требуется время, чтобы нагреть стены, полы, мебель) регулятор не может немедленно ослабить подачу тепла в ответ на возрастание температуры. Регулятор "видит" текущую температуру (которая еще не достигла 20°C), но не может предусмотреть, что через несколько секунд температура будет выше 20°C .

Результат: температура поднимается до 22°C (перерегулирование на 2°C , или на 10% относительно диапазона $0-20^{\circ}\text{C}$). Затем регулятор начинает закрывать клапан, и температура начинает снижаться.

Количественная оценка перерегулирования

Абсолютное перерегулирование - разница между максимальным значением переходной характеристики и установившимся значением:

$$\Delta y_{max} = y_{max} - y_{set}$$

Относительное перерегулирование (в процентах) - отношение абсолютного перерегулирования к установившемуся значению:

$$\sigma = \frac{y_{max} - y_{set}}{y_{set}} \times 100\%$$

или к диапазону регулирования:

$$\sigma = \frac{y_{max} - y_{set}}{y_{range}} \times 100\%$$

Допустимые значения перерегулирования

Небольшое перерегулирование (5-10%) обычно приемлемо и даже желательно, так как оно свидетельствует о быстрой реакции системы и хорошей демпфированности.

Избыточное перерегулирование (более 30%) может быть проблематичным:

- При регулировании давления в котле перерегулирование может привести к срабатыванию предохранительного клапана, что нежелательно.
- При регулировании тока через электрическую нагрузку перерегулирование может привести к перегреву и выходу из строя оборудования.
- При регулировании скорости вращения двигателя большое перерегулирование может привести к механическим повреждениям из-за ударных нагрузок.

Взаимосвязь показателей качества

Показатели качества регулирования взаимосвязаны и часто противоречат друг другу. Невозможно одновременно добиться минимального перерегулирования, минимального времени установления и минимальной статической ошибки - всегда приходится делать выбор.

Приоритет	Оптимальная настройка	Результат
Максимальная скорость реакции	Большой коэффициент усиления	Быстрая реакция, но колебания
Минимальное перерегулирование	Малый коэффициент усиления	Нет колебаний, но медленная реакция
Баланс	Умеренный коэффициент усиления	Приемлемая скорость и минимальные колебания

5.16.5 Законы регулирования: от простого к сложному

Теория регулирования описывает различные законы регулирования, определяющие, как должна изменяться команда регулятора в зависимости от ошибки регулирования (разности между желаемым и текущим значением). Выбор закона регулирования критичен для качества работы системы.

Пропорциональный закон регулирования (Р-регулятор)

Пропорциональный закон: команда регулятора пропорциональна текущей ошибке регулирования:

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

где:

- $u(t)$ - команда регулятора (управляющее воздействие);
- K_p - коэффициент пропорционального усиления (proportional gain);
- $e(t) = y_{set} - y(t)$ - ошибка регулирования.

Физический смысл: Р-регулятор действует "по величине ошибки". Чем больше отклонение регулируемой величины от заданного значения, тем больше управляющее воздействие. Если ошибка равна нулю, управляющее воздействие равно нулю.

Преимущества Р-регулирования:

- Простейший из всех законов, легко реализуется;
- Быстро реагирует на изменения;
- Интуитивно понятен.

Недостатки Р-регулирования:

- **Статическая ошибка.** Р-регулятор не может полностью компенсировать постоянное возмущение. Представим, что на объект действует постоянное возмущение (например, постоянное охлаждение дома через неизолированные стены). Р-регулятор откроет клапан на некоторую величину, определяемую текущей ошибкой, и стабилизируется. Но ошибка остается ненулевой! Для компенсации полного постоянного возмущения требуется, чтобы ошибка была ненулевой, чтобы регулятор продолжал прикладывать управляющее воздействие. Поэтому Р-регулятор всегда имеет остаточную **статическую ошибку** $e_{\infty} \neq 0$.

Статическая ошибка Р-регулятора:

$$e_{\infty} = \frac{d}{1 + K_p K_o b j e c t}$$

где d - возмущение, K_{object} - коэффициент усиления объекта. Видно, что увеличение K_p снижает ошибку, но всегда остается какая-то остаточная ошибка.

• **Ограниченная скорость реакции.** Максимальное управляющее воздействие ограничено диапазоном выходного сигнала регулятора.

Практический пример Р-регулятора: простой термостат в старых холодильниках. При установке определенной температуры два контакта замыкаются, когда температура опускается ниже установленной на 1-2 градуса, компрессор включается. Когда температура поднимается выше установленной на 1-2 градуса, компрессор выключается. Статическая ошибка составляет 1-2°C, что приемлемо для холодильника.

Интегральный закон регулирования (I-регулятор)

Интегральный закон: команда регулятора зависит от накопленной (проинтегрированной) ошибки:

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

или в дифференциальной форме:

$$\frac{du(t)}{dt} = K_i \times e(t)$$

где K_i - коэффициент интегрального усиления (integral gain).

Физический смысл: I-регулятор "помнит" всю историю ошибок. Если на протяжении длительного времени ошибка положительна (регулируемая вели-

чина ниже заданного значения), интеграл ошибки возрастает, и управляющее воздействие продолжает увеличиваться, пока ошибка не станет отрицательной и интеграл не начнет уменьшаться.

Преимущества I-регулирования:

- **Полное устранение статической ошибки.** I-регулятор способен полностью скомпенсировать постоянное возмущение. Когда есть остаточная ошибка, интеграл продолжает возрастать, увеличивая управляющее воздействие, до тех пор пока ошибка не станет нулевой. В установившемся режиме при нулевой ошибке интеграл остается постоянным, поддерживая необходимое управляющее воздействие для компенсации возмущения.

Недостатки I-регулирования:

- **Медленная реакция.** I-регулятор медленно реагирует на изменения, так как требуется время для накопления интеграла ошибки.

- **Склонность к колебаниям.** Если на объект действует сильное возмущение, I-регулятор может долго "разгоняться", прежде чем будет достигнута нужная компенсация. Во время "разгона" регулируемая величина может сильно отклониться от заданного значения. Кроме того, из-за инерции объекта может произойти перерегулирование, когда регулируемая величина превысит заданное значение. После этого ошибка поменяет знак, и интеграл начнет уменьшаться, но уже с ненулевой величины, так как ошибка была положительной в течение некоторого времени. Результатом может быть колебание регулируемой величины вокруг заданного значения.

- **"Ветрение" интегратора (integral windup).** Если на объект действует ограничение управляющего воздействия (например, клапан не может открываться более чем на 100%), интеграл ошибки может продолжать возрастать даже после того, как управляющее воздействие достигло своего максимума. Это приводит к дополнительному перерегулированию и медленному восстановлению после возмущения. Для предотвращения этого используется процедура "anti-windup".

Практический пример: I-регулятор используется в системах регулирования уровня жидкости в резервуаре. Насос качает жидкость в резервуар, скорость откачивания жидкости может меняться. I-регулятор медленно регулирует расход насоса, полностью компенсируя любые изменения расхода откачивания, так что уровень жидкости остается постоянным.

Дифференциальный закон регулирования (D-регулятор)

Дифференциальный закон: команда регулятора зависит от скорости изменения ошибки:

$$u(t) = K_d \times \frac{de(t)}{dt}$$

где K_d - коэффициент дифференциального усиления (derivative gain).

Физический смысл: D-регулятор "смотрит в будущее". Если ошибка быстро меняется (например, быстро уменьшается), это означает, что система хорошо реагирует и вскоре ошибка может стать отрицательной (перерегулирование). D-регулятор предусматрительно уменьшает управляющее воздействие, чтобы предотвратить перерегулирование.

Преимущества D-регулирования:

- **Антиципация и предотвращение колебаний.** D-регулятор быстро реагирует на резкие изменения и предотвращает перерегулирование.

- **Повышение скорости реакции без увеличения колебаний.** D-компонента позволяет увеличить пропорциональный коэффициент без риска неустойчивости.

Недостатки D-регулирования:

- **Чувствительность к шуму.** D-регулятор вычисляет производную ошибки. Если в сигнале датчика присутствует шум (высокочастотные помехи), производная этого шума может быть очень большой, приводя к спазматическим скачкам управляющего воздействия. Это особенно проблематично в системах с низким соотношением сигнал/шум.

- **Неэффективен против постоянных возмущений.** D-регулятор реагирует только на изменения ошибки. Если ошибка постоянна (например, под действием постоянного возмущения), производная ошибки равна нулю, и D-регулятор не выдает никакого управляющего воздействия. Поэтому D-регулятор всегда используется в комбинации с P или I.

Практический пример: D-компонента особенно полезна в системах управления положением, например, в сервоприводах, где требуется быстрый отклик и минимальное перерегулирование.

Комбинированный ПИД-закон регулирования

На практике почти всегда используются **комбинированные ПИД-регуляторы** (PID controllers), сочетающие все три компоненты: пропорциональную, интегральную и дифференциальную:

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

или в альтернативной форме (форме Лапласа):

$$U(s) = K_p \left(E(s) + \frac{1}{T_i s} E(s) + T_d s E(s) \right)$$

где $T_i = K_p/K_i$ - постоянная времени интегрирования, $T_d = K_d/K_p$ - постоянная времени дифференцирования.

Роль каждой компоненты ПИД-регулятора

Компонента	Роль	Эффект при увеличении коэффициента
Р (пропорциональная)	Основное управляющее воздействие, пропорциональное ошибке	Увеличивает скорость реакции, но может привести к колебаниям и статической ошибке
I (интегральная)	Устранение статической ошибки, интегрирование накопленной ошибки	Полностью устраняет статическую ошибку, но может вызвать медленную реакцию и колебания
D (дифференциальная)	Предотвращение перерегулирования, "прогноз" будущей ошибки	Уменьшает перерегулирование и улучшает демпфирование, но чувствителен к шуму

Процесс настройки (пусконаладки) ПИД-регулятора

Правильная настройка ПИД-регулятора - это один из ключевых факторов, определяющих качество регулирования. Процесс настройки требует опыта и часто выполняется методом "подбора".

Методы настройки:

1. **Метод Циглера-Никольса** - классический метод эмпирической настройки. Рекомендуемые значения коэффициентов вычисляются на основе экспериментально определенных параметров объекта управления (критический коэффициент усиления, период колебаний).

2. **Метод "trial and error" (подбор)** - постепенное увеличение коэффициентов P , I , D на основе наблюдения за поведением системы, пока не будет достигнут приемлемый результат.

3. **Компьютерная оптимизация** - использование вычислительных методов для автоматического нахождения оптимальных коэффициентов на основе заданных критериев качества.

4. **Адаптивная настройка** - некоторые современные регуляторы способны автоматически подстраивать свои коэффициенты во время работы в зависимости от параметров объекта.

Практические рекомендации по настройке

Шаг 1: Начинайте с P-компоненты:

- Установите $K_i = 0$ и $K_d = 0$;
- Постепенно увеличивайте K_p до момента, когда система начинает колебаться. Запомните это значение как критическое K_p^{crit} ;
- Установите $K_p \approx 0.6 \times K_p^{crit}$ (это обычно обеспечивает хороший баланс между скоростью и стабильностью).

Шаг 2: Добавьте I-компоненту:

- Если система имеет статическую ошибку, начните увеличивать K_i ;
- Увеличивайте медленно, так как I-компонента может вызвать колебания;
- Установите K_i достаточным для устранения статической ошибки, но не настолько большим, чтобы вызвать колебания.

Шаг 3: Добавьте D-компоненту:

- Если система имеет значительное перерегулирование, начните увеличивать K_d ;
- D-компонента должна снизить перерегулирование и ускорить затухание колебаний;
- Будьте осторожны с шумом в датчике - при высоком K_d шум может усиливаться.

Ниже приведены **наглядные примеры** к каждому виду закона регулирования и к процессу настройки ПИД-регуляторов.

1. Пропорциональный закон регулирования (Р-регулятор)

Пример 1. Регулирование температуры в комнате электрическим обогревателем

Объект: комната с электрическим конвектором.

Заданное значение: $T_{\text{зад}} = 22^\circ\text{C}$.

Фактическая температура: $T(t)$.

Ошибка: $e(t) = T_{\text{зад}} - T(t)$.

Закон Р-регулятора:

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

где $u(t)$ - мощность обогревателя (в относительных единицах, 0-100%), K_p - коэффициент пропорционального усиления.

Сценарий работы:

- На улице похолодало, температура в комнате упала до 18°C . Тогда ошибка: $e = 22 - 18 = 4^{\circ}\text{C}$.
- При $K_p = 10$ регулятор задаёт: $u = 10 \cdot 4 = 40\%$. Обогреватель включается на 40% мощности.
- По мере нагрева комнаты, например при $T = 21^{\circ}\text{C}$: $e = 22 - 21 = 1^{\circ}\text{C}$, $u = 10 \cdot 1 = 10\%$. Мощность уменьшается.
- При некотором устойчивом состоянии установится так, что:
 - теплотери через стены компенсируются подведённым теплом;
 - ошибка, например, будет $e \approx 0,3^{\circ}\text{C}$ (комната держится на $21,7^{\circ}\text{C}$).

Иллюстрация статической ошибки:

Комната никогда не выйдет точно на 22°C , если есть постоянные теплотери. Чтобы обогреватель давал ненулевую мощность в установившемся режиме, нужна ненулевая ошибка - вот и получается остаточная статическая ошибка Р-регулятора.

Пример 2. Р-регулятор скорости конвейерной ленты

Объект: электропривод конвейера.

Заданная скорость: $v_{\text{зад}} = 1,0$.

Фактическая скорость: $v(t)$.

Ошибка: $e(t) = v_{\text{зад}} - v(t)$.

Управляющее воздействие: напряжение на двигателе $u(t)$.

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

Сценарий:

- Конвейер загружают тяжелыми деталями, нагрузка увеличивается, скорость падает до 0,8.
- Ошибка: $e = 1,0 - 0,8 = 0,2$
- При $K_p = 50$: $u = 50 \cdot 0,2 = 10$ то есть регулятор дополнительно увеличивает напряжение на 10 В.
- В новом устойчивом режиме скорость, например, установится на 0,97 - есть небольшая статическая ошибка, но система работает быстро и просто.

Вывод: Р-регулятор обеспечивает приемлемое качество для большинства простых приводов, но выделить «идеальную» скорость без статической ошибки он не может.

2. Интегральный закон регулирования (I-регулятор)

Пример 3. Регулирование уровня жидкости в резервуаре с I-регулятором

Объект: резервуар с жидкостью.

Задача: поддерживать уровень $h_{\text{зад}} = 1,5$.

Вход: расход насоса $q_{\text{вх}}(t)$.

Выход: уровень $h(t)$.

Ошибка: $e(t) = h_{\text{зад}} - h(t)$.

Интегральный закон:

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

где $u(t)$ - сигнал управления на насос (скорость/частота вращения), K_i - интегральный коэффициент.

Сценарий:

- В начале уровень ниже заданного: $h(0) = 1,2$.
- Ошибка в начале: $e(0) = 1,5 - 1,2 = 0,3$
- Интеграл ошибки растёт, I-регулятор постепенно увеличивает расход насоса.
- По мере роста уровня ошибка $e(t)$ уменьшается, но интеграл уже набрал некоторую величину, поэтому расход всё ещё больше, чем нужно.
- Уровень может немного «перелететь» через 1,5, например до 1,55, затем ошибка становится отрицательной, интеграл начинает уменьшаться и уровень возвращается к заданному.
- В установившемся режиме:
 - $h(t) \rightarrow 1,5$,
 - ошибка $e(t) \rightarrow 0$,
 - интеграл перестаёт изменяться, но его накопленное значение поддерживает такое управление $u(t)$, которое точно компенсирует отток.

Ключевой момент: при любых постоянных возмущениях (например, изменился отток) I-регулятор подстроит накопленный интеграл так, что статическая ошибка уровня будет нулевой.

Пример 4. Автоматическое дозирование компонента по массе

Объект: весовой дозатор, который должен насыпать в мешок ровно 25 продукта.

Выход: текущая масса $m(t)$.

Заданная масса: $m_{\text{зад}} = 25$.

Ошибка: $e(t) = m_{\text{зад}} - m(t)$.

Управление: открытие питателя $u(t)$ (0-100%). Используется чистый I-регулятор.

Сценарий:

- В начале мешок пустой, ошибка большая и положительная. Интеграл ошибки растёт, I-регулятор увеличивает $u(t)$, питатель открывается всё сильнее.
- Масса растёт, но ошибка всё ещё положительная, интеграл продолжает накапливаться, управление растёт, подача ускоряется.
- В какой-то момент масса приближается к 25 кг, но за счёт инерции механизма и интеграла ошибки масса, например, переваливает за 25 кг и доходит до 25,3. Ошибка становится отрицательной, интеграл начинает уменьшаться.
- В следующих циклах (при корректной настройке K_i) система самоорганизуется так, что под конец дозирования скорость подачи снижается, и фактическая масса стремится к 25,0 без остаточной ошибки.

Особенность: здесь критично отсутствие статической ошибки - нужно именно заданное количество, а не «примерно». Поэтому I-составляющая крайне полезна.

3. Дифференциальный закон регулирования (D-регулятор)

Пример 5. Торможение сервопривода при подходе к целевой позиции

Объект: сервопривод, поворачивающий вал на заданный угол.

Выход: угол $\theta(t)$.

Заданное значение: $\theta_{\text{зад}}$.

Ошибка: $e(t) = \theta_{\text{зад}} - \theta(t)$.

Закон D-регулятора:

$$u(t) = K_d \frac{de(t)}{dt},$$

где $u(t)$ - управляющий момент/напряжение, K_d - дифференциальный коэффициент.

Сценарий:

- В начале двигатель стартует, ошибка большая и изменяется быстро: $\frac{de}{dt}$ велика.
- D-регулятор видит, что ошибка быстро уменьшается (двигатель хорошо разгоняется), поэтому заранее уменьшает или даже прикладывает тормозной момент (зависит от знака производной).
- В результате, ещё до того, как ошибка станет нулевой, у привода уже снижена скорость, и он «мягко» подходит к заданному углу без значительного перерегулирования.

Смысл: D-компонента реагирует не столько на величину ошибки, сколько на её скорость изменения - фактически «предвидит» будущее поведение.

Пример 6. Платформа с виброизоляцией и D-регулятором

Объект: платформа на пружинах (например, с чувствительным оборудованием), которую нужно держать на заданном вертикальном положении.

Выход: смещение $x(t)$ от заданного положения.

Ошибка: $e(t) = -x(t)$.

Управление: сила/момент компенсирующего привода.

Используется D-регулятор по производной ошибки, чтобы «гасить» колебания:

$$u(t) = K_d \frac{de(t)}{dt}.$$

Сценарий:

- Из-за внешних колебаний платформа начинает двигаться вверх-вниз.
- Когда платформа движется быстро вверх (хотя может ещё не дошла до нулевой ошибки), производная ошибки указывает на то, что скоро будет превышение заданного положения.
- D-регулятор заранее создаёт управляющее воздействие, направленное на торможение движения, тем самым уменьшая амплитуду колебаний.

Ограничение: при наличии шума в измерении положения (например, из-за вибраций датчика) производная этого шума даёт резкие скачки $u(t)$, поэтому в реальных системах D-составляющую фильтруют или ограничивают.

4. Комбинированный ПИД-закон регулирования

Пример 7. PID-регулятор температуры печи

Объект: термическая печь с большой тепловой инерцией.

Выход: температура внутри печи $T(t)$.

Заданное значение: $T_{\text{зад}} = 800^\circ\text{C}$.

Управление: мощность нагревателей $u(t)$ (0-100%).

Используется ПИД-регулятор:

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

где $e(t) = T_{\text{зад}} - T(t)$.

Роль компонентов в конкретной ситуации:

- **Р-составляющая:** быстро реагирует на разницу между текущей и заданной температурой. Если печь холодная, Р-часть даёт большую мощность.
- **І-составляющая:** со временем подстраивает мощность так, чтобы в установившемся режиме температура была ровно 800 °С, несмотря на теплопотери, загрузку деталей и т.п. Статическая ошибка устраняется.
- **Д-составляющая:** «тормозит» нагрев, когда температура быстро поднимается и приближается к 800 °С, чтобы не было перерегулирования (например, до 830-850 °С).

Сценарий:

- Старт: печь на 20°С, ошибка большая, Р + І дают почти 100% мощности.
- По мере нагрева скорость роста температуры увеличивается, производная ошибки возрастает по модулю, Д-компонента уменьшает эффективное управляющее воздействие, делая подъём температуры более плавным вблизи уставки.
- В установившемся режиме:
 - Р-часть невелика (ошибка почти ноль),
 - Д-часть ≈ 0 (ошибка почти не меняется),

- I-часть держит такую мощность, которая точно компенсирует теплопотери - температура удерживается на уровне 800 °С без статической ошибки.

Пример 8. PID-регулятор скорости привода намоточного станка

Объект: привод намотки кабеля.

Задача: поддерживать постоянную линейную скорость намотки $v_{\text{зад}}$, несмотря на изменение диаметра барабана.

Выход: фактическая скорость намотки $v(t)$.

Управление: ток двигателя $u(t)$.

Проблема: при увеличении диаметра барабана момент нагрузки изменяется, двигатель «тяжелее» разгонять/тормозить. Простого Р-регулятора часто недостаточно - может появиться статическая ошибка и/или колебания.

Решение: используем ПИД-регулятор:

- **Р:** обеспечивает базовую жёсткость по скорости.
- **I:** компенсирует изменение условий (момент нагрузки, трение), устраняя статическую ошибку скорости.
- **D:** сглаживает переходные процессы при резком изменении задающего сигнала или при возмущениях (рывки натяжения кабеля).

Результат: скорость поддерживается с высокой точностью и без заметных пере-регуляций, что важно для качества намотки.

5. Примеры настройки (пусконаладки) ПИД-регулятора

Пример 9. Настройка П-регулятора по шаговому воздействию

Объект: система подогрева воды в теплообменнике.

Шаг 1. Включается только Р-составляющая, $K_i = 0$, $K_d = 0$.

- Плавно увеличивают K_p , подавая ступенчатое изменение задания температуры.
- При малом K_p система медленно выходит на уставку, без колебаний, но с большой статической ошибкой.
- При некотором $K_p = K_{кр}$ система начинает колебаться устойчиво (граница устойчивости).
- Для нормальной работы выбирают $K_p \approx 0,5 \dots 0,7 K_{кр}$ - система быстро выходит на уставку, перерегулирование умеренное.

Это - практическая иллюстрация первого шага настройки по типу метода Циглера-Никольса.

Пример 10. Добавление I-составляющей для устранения статической ошибки

Продолжение предыдущего примера.

Шаг 2. При выбранном K_p заметна статическая ошибка температуры, например 2°С ниже уставки.

- Включается интегральная составляющая: выбирается начальное значение K_i (или времени интегрирования T_i).
- Небольшое K_i приводит к медленному устранению статической ошибки, но система остаётся устойчивой.

- Увеличивая K_i , добиваются:
 - практически нулевой статической ошибки,
 - умеренного перерегулирования (его рост говорит, что K_i уже слишком велик).

Иллюстрация: при слишком большом K_i появляется «раскачивание» температуры вокруг уставки - хороший наглядный пример влияния интегратора.

Пример 11. Добавление D-составляющей для уменьшения перерегулирования

Шаг 3. У системы всё ещё есть заметное перерегулирование температуры (например, превышение уставки на 10°C при скачке задания).

- Включают дифференциальную составляющую: задают K_d или время дифференцирования T_d .
- При малом K_d переходный процесс почти не меняется.
- Постепенно увеличивая K_d , добиваются:
 - уменьшения перерегулирования,
 - более быстрого затухания колебаний.

Ограничение: при слишком большом K_d и наличии помех в измеренном сигнале датчика (например, шум термопары) управляющее воздействие начинает «дёргаться», могут быть случаи выхода регулятора на пределы.

6. Пример «ветрения» интегратора (integral windup) и anti-windup

Пример 12. Перегрев при ограничении мощности нагревателя

Объект: тот же теплообменник, но мощность нагрева ограничена 100%.

Регулятор: ПИ-регулятор.

При сильном возмущении (например, в систему пошла очень холодная вода):

- Ошибка температуры долго остаётся большой и положительной.
- I-составляющая накапливает большую величину интеграла.
- Мощность нагрева упирается в максимум 100%, но интеграл продолжает расти (ветрение интегратора).
- Когда температура наконец достигает уставки и проходит её, интеграл всё ещё велик, регулятор продолжает подавать практически максимальную мощность - происходит большое перерегулирование.

Мера защиты (anti-windup):

- Ограничивают рост интеграла, когда управляющий сигнал достиг предела (100%).
- Либо «замораживают» интегратор при насыщении.
- Либо «разматывают» интеграл обратно, учитывая разность между выходом регулятора и реально доступным управляющим сигналом.

Такой пример хорошо иллюстрирует необходимость специальных алгоритмов защиты от windup при наличии насыщений исполнительных механизмов.

Повный Андрей Владимирович

Замечания и предложения: TG - @AndyPovny

Сайт: <https://electricalschool.info/>, канал в Telegram: <https://t.me/electricalschool>